

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU  
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

**Mémoire de fin d'études**  
Présenté en vue de l'obtention  
Du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique

OPTION : Machine électrique

*Thème:*  
*Optimisation d'une série de moteurs  
asynchrones triphasés a cage d'écureuil*

Dirigé par :  
**BELASSEL M.TAHAR**  
**BENTAHA DJILALI**

Etudié par  
**Mr: AKKOU DJAMEL**  
**Mr: MEZIANE BOUMEDIENE**

Promotion 2008

# **SOMMAIRE**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introduction générale.....</b>                       | <b>01</b> |
| <b>Notations principales.....</b>                       | <b>03</b> |
| <b>Cahier de charge.....</b>                            | <b>07</b> |
| <b>Présentation de l'entreprise (E-I) d'AZAZGA.....</b> | <b>08</b> |

## **PARTIE I : Généralités sur les moteurs asynchrones :**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>I.1. Introduction.....</b>                        | <b>11</b> |
| <b>I.2. Définition.....</b>                          | <b>11</b> |
| <b>I.3. Construction et fonctionnement.....</b>      | <b>12</b> |
| <b>I.3.1. Construction.....</b>                      | <b>12</b> |
| <b>I.3.1.1. Stator des machines asynchrones.....</b> | <b>12</b> |
| <b>I.3.1.2. Rotor des machines asynchrones.....</b>  | <b>13</b> |
| <b>I.3.2. Principe de fonctionnement.....</b>        | <b>15</b> |
| <b>I.4. Démarrage des moteurs asynchrones.....</b>   | <b>17</b> |
| <b>I.4.1. Moteur à rotor bobiné.....</b>             | <b>17</b> |
| <b>I.4.2. Moteur à cage d'écureuil.....</b>          | <b>18</b> |

## **PARTIE II : Calcul électromagnétique**

### **CHAPITRE I : Dimensionnement du stator et du rotor:**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>I.1. Introduction.....</b>  | <b>19</b> |
| <b>I.2. Dimensionnement du stator.....</b>                           | <b>19</b> |
| <b>I.3. Dimensionnement de la feuille magnétique statorique.....</b> | <b>23</b> |
| <b>I.4. Dimensionnement de la feuille magnétique rotorique.....</b>  | <b>26</b> |
| <b>I.4.1. Introduction.....</b>                                      | <b>26</b> |
| <b>I.4.2. Dimensionnement du rotor.....</b>                          | <b>27</b> |
| <b>I.5. Dimensionnement de l'anneau de court-circuit.....</b>        | <b>29</b> |

### **CHAPITRE II. Calcul du circuit magnétique :**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>II.1. Introduction.....</b>                                  | <b>33</b> |
| <b>II.2. Circuit magnétique statorique.....</b>                 | <b>33</b> |
| <b>II.3. Circuit magnétique rotorique.....</b>                  | <b>34</b> |
| <b>II.4. Force magnétomotrice dans l'entrefer.....</b>          | <b>35</b> |
| <b>II.5. Force magnétomotrice totale par paire de pôle.....</b> | <b>36</b> |
| <b>II.6. Coefficient de saturation.....</b>                     | <b>36</b> |

|   |    |
|---|----|
| II.7. Courant magnétisant.....  | 37 |
| II.8. Réactance de magnétisation.....   | 37 |
| II.9. Coefficient de dispersion du stator.....                                      | 37 |
| II.10. Force électromotrice à vide.....   | 37 |
| <b>CHAPITRE III. Calcul des paramètres et des performances :</b>                    |    |
| III.1. Calcul des paramètres.....   | 38 |
| III.1.1. Introduction.....  | 38 |
| III.1.2. Paramètres statorique.....   | 38 |
| III.1.2.1. Résistance active d'une phase du stator.....                             | 38 |
| III.1.2.2. Réactances de fuites et perméances de fuites du stator.....              | 39 |
| III.1.3. Paramètres rotorique.....  | 40 |
| III.1.3.1. Calcul de la résistance rotorique.....                                   | 40 |
| III.1.3.2. Calcul de la réactance de dispersion.....                                | 42 |
| III.1.3.3. Réactance du rotor ramenée au stator.....                                | 44 |
| III.1.4. Paramètres de démarrage.....   | 44 |
| III.1.5. Calcul de la masse.....  | 46 |
| III.1.5.1. Calcul du moment d'inertie dynamique.....                                | 46 |
| III.1.5.2. Calcul du conducteur isolé de l'enroulement.....                         | 46 |
| III.1.5.3. Calcul de la masse de l'aluminium de l'enroulement à cage du rotor ..... | 46 |
| III.1.5.4. Calcul de la masse du noyau statorique et rotorique.....                 | 47 |
| III.2. Calcul des performances.....   | 47 |
| III.2.1. Introduction.....  | 47 |
| III.2.2. Pertes principales dans le fer.....  | 48 |
| III.2.3. Pertes électriques dans le cuivre et l'aluminium.....                      | 48 |
| III.2.4. Pertes mécaniques.....   | 49 |
| III.2.5. Pertes supplémentaires.....  | 49 |
| III.2.6. Pertes totales.....  | 50 |
| III.2.7. Rendement de la machine.....   | 50 |
| III.2.8. Calcul de la résistance de magnétisation.....                              | 50 |
| III.2.9. Caractéristique de fonctionnement de moteur.....                           | 50 |
| III.2.10. caractéristique de démarrage et capacité de surcharge.....                | 54 |

## **PARTIE III. Calcul thermique**

### **CHAPITRE I. Calcul de l'échauffement**

|                        |    |
|------------------------|----|
| I.1. Introduction..... | 58 |
|------------------------|----|

|   |    |
|---|----|
| I.2. Calcul de l'écart de température entre la surface intérieure du noyau statorique et celle de l'air à l'intérieur du moteur.....                  | 59 |
| I.3. Calcul de la chute de température dans l'isolation de la parie d'encoche de l'enroulement du stator.....   | 59 |
| I.4. Calcul de l'augmentation de température dans la surface extérieur des parties frontales sur la température de l'air à l'intérieur du moteur..... | 60 |
| I.5. calcul de la chute de température dans l'isolation des parties frontales de l'enroulement statorique.....  | 60 |
| I.6. La valeur moyenne de l'augmentation de la température de l'enroulement statorique sur la température de l'air à l'intérieur du moteur....        | 60 |
| I.7. Surface conventionnelle de refroidissement du moteur.....  | 60 |
| I.8. Pertes transmises dans l'air à l'intérieur du moteur.....  | 61 |
| I.9. Ecart moyen de température entre l'air à l'intérieur du moteur et la température du milieu réfrigérant.....                                      | 61 |
| I.10. Ecart moyen de température de l'enroulement statorique et la température du milieu réfrigérant.....   | 61 |
| I.11. La température moyenne de l'enroulement statorique.....   | 61 |

## **CHAPITRE II. Calcul de la ventilation**

|   |    |
|---|----|
| II.1. Introduction.....   | 62 |
| II.2. Importance de problème.....                                 | 62 |
| II.2.1. Du point du vue mécanique.....                            | 62 |
| II.2.2. Du point du vue économique.....                           | 62 |
| II.2.3. Du point de vue électrique.....                           | 63 |
| II.3. Calcul.....   | 63 |
| II.3.1. Dimension du ventilateur.....                             | 63 |
| II.3.2. Résistance aérodynamique de la chaine de ventilation..... | 64 |

|                       |           |
|-----------------------|-----------|
| <b>Résultats.....</b> | <b>65</b> |
|-----------------------|-----------|

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Interprétation des résultats.....</b> | <b>71</b> |
|--|-----------|

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| <b>Conclusion Générale.....</b> | <b>73</b> |
|---------------------------------|-----------|

## **Annexe**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Annexe I : Programme de calcul.....</b> | <b>74</b> |
|--|-----------|

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| <b>Annexe II : Tableaux.....</b> | <b>109</b> |
|----------------------------------|------------|

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| <b>Annexe III : Courbes.....</b> | <b>114</b> |
|----------------------------------|------------|

## **Bibliographie.**

*Introduction*

Générale

# Introduction générale

En 1889, l'ingénieur russe **M.DOLIVO-DOBROVOSKI** a inventé un moteur asynchrone triphasé, qui est devenu par la suite le plus employé de toutes les machines électriques, conserve presque sans modifications ses parties constitutives essentielles. Etant simple de construction, d'un prix de revient bon marché et de fonctionnement sûr, ce moteur présente de bonnes caractéristiques mécaniques.

Par suite, les études ont démontrés que le moteur asynchrone est presque idéal mais présente un problème au démarrage car il développe un couple relativement faible par rapport au courant appelé, ce qui implique un temps de démarrage important induisant des échauffements néfastes pour la machine.

Les moteurs asynchrones transforment l'énergie électrique en énergie mécanique, ceux à cage d'écureuil sont les plus employés vue les différents avantages qu'ils présentent à savoir : la simplicité de construction, la facilité de mise en œuvre, la fiabilité, la robustesse et le bon rendement.

Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement des machines tournantes, ces méthodes diffèrent d'un constructeur à un autre. En conséquence, la construction des machines est devenue un 'art' basé sur des formules semi-empiriques où chaque constructeur développe une méthode de calcul plus ou moins précise basé sur des abaques.

Dans le cadre de notre projet de fin d'étude, l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIE(E-I) d'Azazga (ex-ENEL) nous a confié de faire le calcul optimale de la gamme d'une série de moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil, en variant le diamètre extérieur et aussi le rapport du diamètre intérieur sur le diamètre extérieur  $K_d$ , en utilisant le logiciel de calcul MATHCAD 13. (Voir le diagramme de la page 2).

Le contenu de notre travail est devisé en trois parties :

La première partie est consacrée aux généralités sur les machines asynchrones.

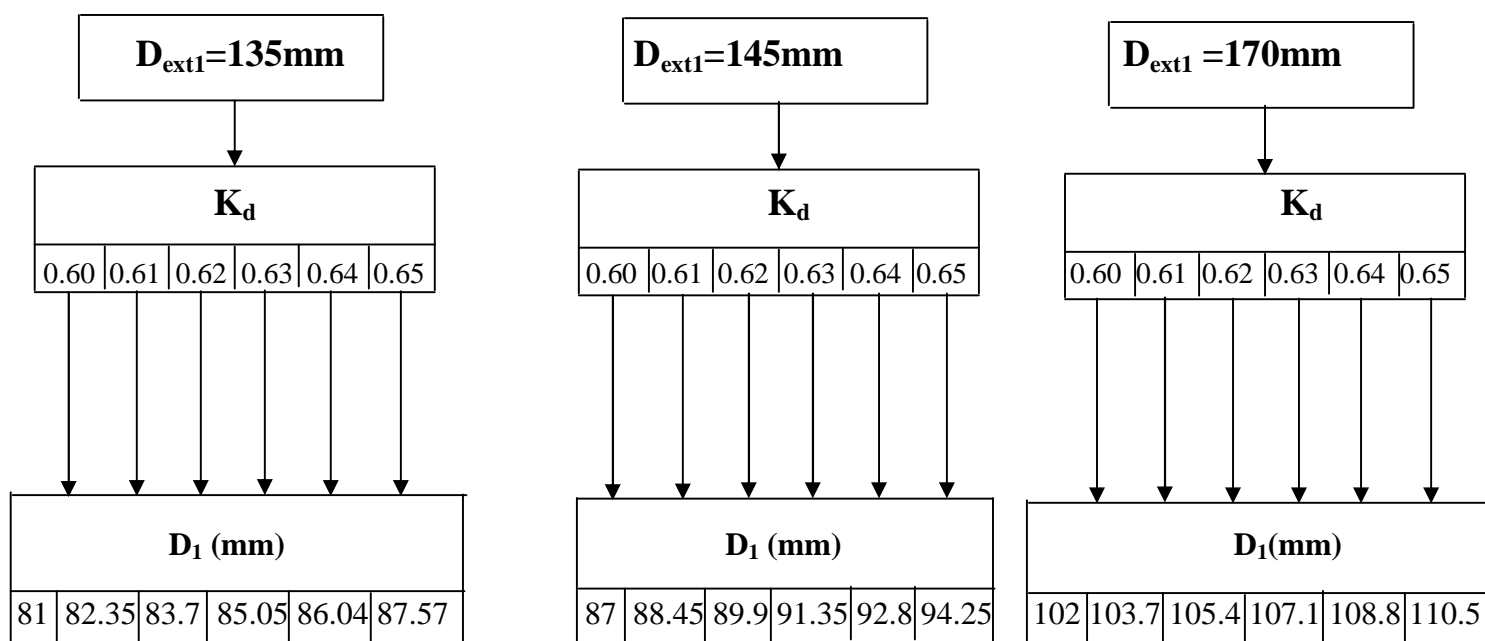
La deuxième partie est consacré pour le calcul électromagnétique, elle est constituée de trois chapitres, le premier est le dimensionnement du stator est du rotor tandis que le deuxième est réservé au calcul du circuit magnétique. Dans le troisième chapitre nous avons procédés à la détermination des paramètres et les performances de la machine.

La troisième partie qui est consacrée au calcul thermique, elle est répartie en deux chapitres. Le premier traite le calcul de l'échauffement, quant au deuxième, il est réservé au calcul de la ventilation.

On termine notre travail par une conclusion générale.

### Le diagramme des différents diamètres extérieurs et des différents $K_d$

Pour une hauteur d'axe  $h=100$  mm



## Notations principales

$A_1$  : Charge linéaire, [A/m]

$a_1$  : Nombre de voie parallèle

$B_\delta$  : Induction magnétique dans l'entrefer, [T]

$B_{C1}$  : Induction magnétique dans le dos du stator, [T]

$B_{C2}$  : Induction magnétique dans la culasse rotorique, [T]

$B_{Z1}$  : Induction magnétique dans les dents du stator, [T]

$B_{Z2}$  : Induction magnétique dans les dents du rotor, [T]

$b_{an}$  : Largeur de l'anneau, [mm]

$b_{f1}$  : Ouverture de l'encoche statorique, [mm]

$b_{f2}$  : Ouverture de l'encoche rotorique, [mm]

$b_{Z1}$  : Largeur de la dent statorique, [mm]

$b_{Z2}$  : Largeur de la dent rotorique, [mm]

$b_{moy}$  : Largeur moyenne d'une section, [mm]

$b_{pp}$  : Largeur à la limite de pénétration magnétique au démarrage, [mm]

$C_d$  : Couple de démarrage du moteur, [N.m]

$C_{nom}$  : Couple nominal du moteur, [N.m]

$C_U$  : Couple utile sur l'arbre, [N.m]

$C_5$  : Capacité de surcharge du moteur,

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

$D_{an}$  : Diamètre moyen de l'anneau de court-circuit, [mm]

$D_{ext1}$  : Diamètre extérieur du stator, [mm]

$D_1$  : Diamètre intérieur du stator, [mm]

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

$D_{2int}$  : Diamètre intérieur du rotor, [mm]

$d_{enc21}$  : Diamètre intérieur de l'encoche du rotor, [mm]

$d_{enc22}$  : Diamètre supérieur de l'encoche du rotor, [mm]

$d_{enc11}$  : Largeur minimale de l'encoche statorique, [mm]

$d_{enc12}$  : Largeur maximale de l'encoche statorique, [mm]

$E_0$  : F.E.M à vide, [V]

$f$  : Fréquence des courants d'alimentation, [Hertz]



**$F_{\delta}$  : F.M.M dans l'entrefer, [A]**

**$F_{C1}$  : F.M.M dans la culasse du stator, [A]**

**$F_{C2}$  : F.M.M dans la culasse du rotor, [A]**

**$F_{Z1}$  : F.M.M dans les dents du stator, [A]**

**$F_{Z2}$  : F.M.M dans les dents du rotor, [A]**

**$\Sigma F$  : F.M.M totale, [A]**

**$G_{C1}$  : Poids du dos du stator, [Kg]**

**$G_{Z1}$  : Poids du dos du stator, [Kg]**

**$g$  : Glissement,**

**$g_{cr}$  : Glissement critique,**

**$g_{nom}$  : Glissement nominal,**

**$H_c$  : intensité du champ magnétique dans les culasses, [A/m]**

**$H_z$  : intensité du champ magnétique dans les dents, [A/m]**

**$H$  : hauteur d'axe, [mm]**

**$h_{enc1}$  : hauteur de l'encoche statorique,**

**$h_{enc2}$  : hauteur de l'encoche rotorique,**

**$h_b$  : hauteur de la barre,**

**$h_{f1}$  : hauteur de la fente statorique, [mm]**

**$h_{f2}$  : hauteur de la fente rotor que, [mm]**

**$h_{z1}$  : hauteur de la dent du stator, [mm]**

**$h_{z2}$  : hauteur de la dent du rotor, [mm]**

**$h_{an}$  : hauteur de l'anneau, [mm]**

**$h_{kl}$  : hauteur de la clavette de l'encoche statorique, [mm]**

**$I_{nom}$  : Courant nominal statorique, [A]**

**$I_2$  : courant nominal rotorique, [A]**

**$I_{\mu}$  : Courant magnétisant, [A]**

**$J_1$  : Densité du courant dans le stator, [A/mm<sup>2</sup>]**

**$J_b$  : Densité du courant dans la barre, [A/mm<sup>2</sup>]**

**$K_d$  : coefficient du rapport du diamètre intérieur et du diamètre extérieur,**

**$K_{fer}$  : Coefficient de remplissage du paquet des tôles,**

**$K_{d1}$  : Coefficient de distribution du stator,**

**$K_{enr}$  : Coefficient d'enroulement,**

**$K_{r1}$  : Coefficient de raccourcissement de l'enroulement,**

**$K_f$**  : Facteur de forme,  
 **$K_\mu$**  : Coefficient de saturation de la machine,  
 **$K_{red}$**  : coefficient de réduction des paramètres de l'anneau,  
 **$L_i$**  : Longueur virtuelle de l'induit, [mm]  
 **$L_c$**  : Longueur moyenne des lignes du champ dans la culasse, [mm]  
 **$L_{f1}$**  : Longueur moyenne de la partie frontale d'une demi-spire, [mm]  
 **$L_{w1}$**  : Longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique, [mm]  
 **$N_s$**  : Vitesse de synchronisme, [tour/min]  
 **$N$**  : Vitesse du l'arbre du rotor, [tour/min]  
 **$N_p$**  : Nombre des ailettes,  
 **$m_1$**  : Nombre de phases statoriques,  
 **$P$**  : nombre de pair de pôles de la machine,  
 **$P_{nom}$**  : puissance nominale de la machine, [Kw]  
 **$P_u$**  : Puissance utile de l'arbre du rotor, [Kw]  
 **$P_{em}$**  : Puissance électromagnétique, [KVA]  
 **$P_{mec}$**  : pertes mécanique, [W]  
 **$P_{fer}$**  : Pertes fer, [W]  
 **$P_{sup}$**  : Pertes supplémentaires, [W]  
 **$P_j$**  : Pertes joule, [W]  
 **$q_1$**  : Nombre d'encoche par pôle et par phase du stator,  
 **$q_2$**  : Nombre d'encoche par pôle et par phase du rotor,  
 **$Q_b$**  : Débit d'air d'un ventilateur, [m<sup>3</sup>/s]  
 **$R_1$**  : Résistance active d'une phase statorique, [ $\Omega$ ]  
 **$R_2$**  : Résistance active d'une phase statorique, [ $\Omega$ ]  
 **$R_{an}$**  : Résistance de l'anneau de court circuit, [ $\Omega$ ]  
 **$R_{2ram}$**  : Résistance ramenée, [ $\Omega$ ]  
 **$R_m$**  : Résistance magnétisante, [ $\Omega$ ]  
 **$R_{2dem}$**  : Résistance de la cage au démarrage, [ $\Omega$ ]  
 **$S_{enc1}$**  : Section de l'encoche statorique, [mm<sup>2</sup>]  
 **$S_{enc2}$**  : Section de l'encoche rotorique, [mm<sup>2</sup>]  
 **$S_{eff}$**  : section effective d'un conducteur, [mm<sup>2</sup>]  
 **$S_{an}$**  : Section de l'anneau, [mm<sup>2</sup>]

**$S_{bp}$  : Surface d'une ailette, [mm<sup>2</sup>]**

**$t_1$  : Pas dentaire statorique, [mm]**

**$t_2$  : pas dentaire rotorique, [mm]**

**$U_{enc1}$  : Nombre de conducteur par encoche du stator,**

**$U_{nom}$  : Tension nominale d'alimentation, [V]**

**$W_1$  : Nombre de spire d'une phase du stator,**

**$X_1$  : Réactance de l'enroulement statorique, [ $\Omega$ ]**

**$X_2$  : Réactance de la cage au rotor, [ $\Omega$ ]**

**$X_0$  : Réactance de dispersion de l'enroulement rotorique, [ $\Omega$ ]**

**$X_{2ram}$  : Réactance de la cage ramenée au stator, [ $\Omega$ ]**

**$X_{2dém}$  : Réactance de la cage au démarrage, [ $\Omega$ ]**

**$X_{0ram}$  : Réactance de dispersion de l'enroulement rotorique ramenée au stator, [ $\Omega$ ]**

**$Z_1$  : Nombre d'encoches statorique,**

**$Z_2$  : Nombre d'encoches rotorique,**

**$\alpha_i$  : Coefficient de recouvrement polaire,**

**$\square$  : Rapport de raccourcissement,**

**$\delta$  : épaisseur de l'entrefer, [mm]**

**$\square$  : Rendement de la machine,**

**$\lambda_i$  : Coefficient de géométrie de la machine,**

**$\lambda_{d1}, \lambda_{d2}$  : Perméance différentielles statorique et rotorique respectivement,**

**$\lambda_{1f}, \lambda_{2f}$  : Perméance frontales statorique et rotorique respectivement,**

**$\lambda_{enc1}, \lambda_{enc2}$  : Perméance de dispersion d'encoche de stator et de rotor respectivement,**

**$\rho_{AL}$  : Résistivité de l'Aluminium, [ $\Omega.m$ ]**

**$\rho_{CU}$  : Résistivité du cuivre, [ $\Omega.m$ ]**

**$\tau$  : Pas polaire, [mm]**

**$\sigma$  : Coefficient de dispersion magnétique du stator.**

## **I. Présentation de l'entreprise :**

A l'origine, l'entreprise est issue de la réorganisation du secteur opérée en Algérie entre 1980 et 2000 qui a conduit en 1999 à la restructuration de l'ancienne ENEL (entreprise national des industries électrotechniques) en un certain nombre d'entreprise publique économique, société par action (EPE/SPA), parmi les quelles figure « ELECTRO-INDUSTRIE » au capital de 4.753.000.000 DA.

L'usine a été réalisée dans le cadre d'un partenariat avec les entreprises Allemande ; SIEMENS pour le produit et FRITZ WERNER pour l'engineering et la construction, l'infrastructure est réalisée par les entreprises Algériennes ECOTEC, COCIDER, et BATIMAL.

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

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

Les produits fabriqués par l'ELECTRO-INDUSTRIES sont conformes aux recommandations CEI et aux normes Allemands DIN/VDE.

### **I.1.Gamme de fabrication :**

Les moteurs électriques, basses tensions, fabriqués par Electro-industries Azazga sont du type asynchrone triphasé à une ou deux vitesses et monophasés à condensateurs.

De construction fermée, à carcasse ventilée, en alliage d'aluminium et on fente. Les rotors sont en court-circuit, à cage d'écureuil, à cage d'écureuil, en en aluminium pur (petit et moyens moteurs) et en barre de cuivre (grands moteurs).

#### **I.1.1 : Moteurs triphasés à une seule vitesse :**

| Gamme              | Aluminium          | Fente     |           |
|--------------------|--------------------|-----------|-----------|
| Hauteur d'axe (mm) | 71 à 132           | 160 à 250 | 280 à 400 |
| Puissance(KW)      | 0,25 à 9           | 11 à 55   | 75 à 400  |
| Vitesse (Tr/min)   | 1000 – 1500 - 3000 |           |           |

### **I.1.2 : Moteurs triphasés à deux vitesses :**

|                   |             |             |             |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| Vitesses (Tr/min) | 750 / 1500  | 1000 / 1500 | 1500 / 3000 |
| Puissance (KW)    | 0,35 / 0,65 | 0,48 / 0,68 | 0,48 / 0,60 |
|                   | à           | à           | à           |
|                   | 3 / 4,5     | 5,70 / 7,80 | 3,7 / 4,4   |

### **I.1.3 : Moteurs monophasés à condensateurs :**

|                    |             |
|--------------------|-------------|
| Hauteur d'axe (mm) | 0,71 à 100  |
| Puissances (KW)    | 0,25 à 2,2  |
| Vitesses (Tr/min)  | 1500 - 3000 |

## **I.2 : Caractéristiques générales :**

Les caractéristiques ci-dessous sont relatives aux moteurs standards.

Des caractéristiques différentes peuvent être fournies sur demande.

- ✓ Tensions nominales à 50 Hz : 220V – 380V – 660V (Tolérance+ou-5%).
- ✓ Type de service : S1 continu ( Température ambiante 40°C et altitude 1000m).
- ✓ Classe d'isolation : F (tropicalisée).
- ✓ Refroidissement et ventilation : Ventilateur externe monté sur l'arbre, protégé par un capot.
- ✓ Formes de construction : B3 – B5 – B35.
- ✓ Equilibrage dynamique des rotors avec clavettes.
- ✓ Degré de protection : IP 54 – IP 55.
- ✓ Paliers des moteurs de HA 71 à 250mm sont graissés à vie.
- ✓ Paliers des moteurs de HA 280à 400 sont munis d'un dispositif de graissage.
- ✓ Peinture standard : Gris pierre RAL 7030.

## **I.3 : Options :**

Sur demande, les moteurs électriques fabriqués par ELECTRO-INDUSTRIES peuvent être exécutés avec les options suivantes ;

### **I.3.1 : Options mécaniques :**

- ✓ Bout d'arbre spécial (long, conique, avec filtrage,.....)
- ✓ Deux bouts d'arbres standards ou spéciaux.
- ✓ Bride spéciale (bord de centrage, trous de fixation,.....)
- ✓ Graisseurs pour paliers d'un coté ou des deux coté.
- ✓ Roulements spéciaux.
- ✓ Sans ventilateur (moteur non ventilé).
- ✓ Capot de protection pour la marche verticale (bout d'arbre vers le bas).
- ✓ Degrés de protection IP 56 et IP 65.

### **I.3.2 : Options électriques :**

- ✓ Tensions spéciales (jusqu'à 690 V).
- ✓ Isolation classe H.
- ✓ Sondes thermiques (CTP, PTO).
- ✓ Résistance de réchauffage.

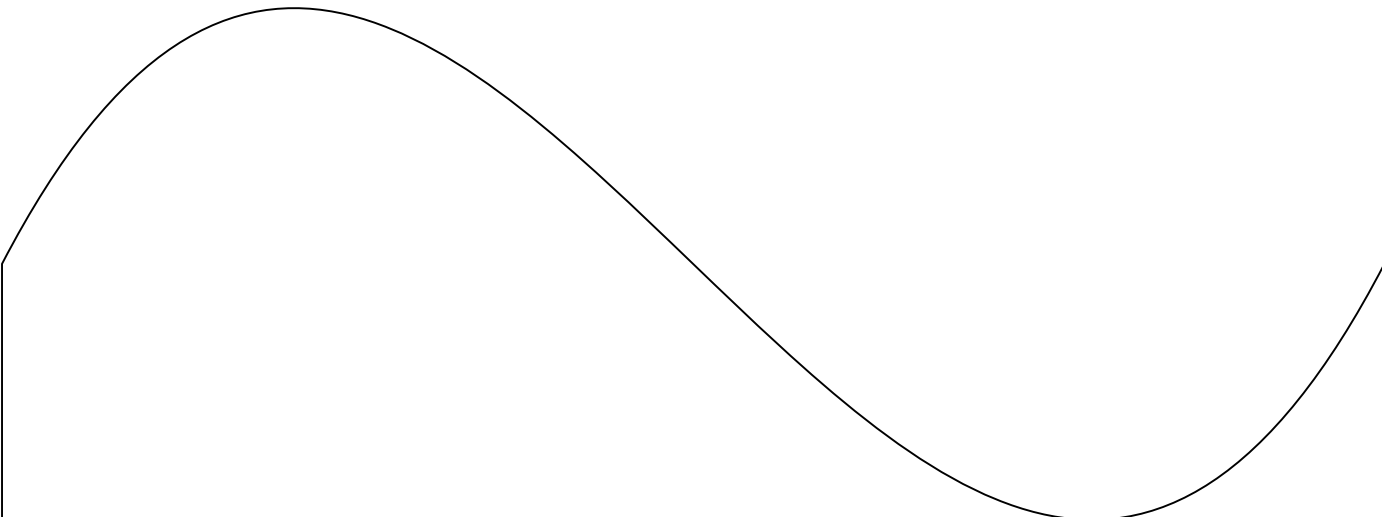
### **I.4 : performances et applications :**

Nos moteurs électriques alimentés et pilotés par des variateurs électriques de puissance permettent d'obtenir les performances suivantes :

- Variation de la vitesse de rotation.
- Démarrage progressif.
- Freinage.

Et de répondre aux applications suivantes :

- Charges mécaniques à couple variable :
  - Pompes, ventilateurs, compresseurs, broyeurs, extrudeuses, calandres, etc.....
- Charges mécaniques à couple constant :
  - Mécanisme de manutention (treuils, élévateurs, convoyeurs, etc.....)
  - Machines outils à force de groupe constante (rectifieuse, raboteuses, cisailles, etc.....)
  - Laminoirs ou broyeurs à rouleaux.



# Partie I

## Généralités sur les moteurs asynchrones



## **I.1. Introduction :**

Une machine électrique est un dispositif électromagnétique permettant la conversion d'énergie en travail ou en énergie mécanique, ou qui fournit de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie.

Les machines électriques qui produisent une énergie électrique à partir d'une énergie mécanique sont appelées dynamo, alternateurs ou générateurs suivant la technologie utilisé.

Toutes les machines électriques étant réversibles, la distinction moteur /générateur ne se fait que sur l'usage final de la machine.

Comme toutes les machines électriques tournantes, les moteurs électriques sont constitués d'un stator (partie fixe) et d'un rotor (partie mobile).

Il existe des moteurs électriques à courant continu (DC) et des moteurs électriques à courant alternatif (AC). Dans la catégorie des moteurs à courant alternatif, on peut retrouver :

- Moteurs synchrones.

- Moteurs asynchrones qui feront l'objet de notre étude.

Les moteurs asynchrones triphasés sont les moteurs les plus employés dans l'industrie, cette importance peut être déduite d'une statistique qui indique que plus de 50% de l'énergie produite est transformé en énergie mécanique par les machines asynchrones. Ils possèdent en effet plusieurs avantages : simplicité, robustesse, prix peu élevé et entretien facile.

## **I.2. définition :**



La machine asynchrone connue également sous le terme (Anglo-saxon) de machine à induction, est une machine à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor.

Le terme (asynchrone) provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent.

Le rotor de cette machine peut se retrouver sous deux formes :

- Le rotor bobiné ;
- Le rotor à cage d'écureuil (simple cage ou double cage).

### **I. 3.Construction et fonctionnement :**

#### **I.3.1. construction :**

La machine asynchrone comprend :

- Un paquet statorique feuilleté ferromagnétique qui porte dans les encoches des enroulements polyphasés ; ce bobinage est appelé <primaire de la machine>.
- Un rotor feuilleté à cage d'écureuil ou bien avec un bobinage généralement polyphasé de même nombre de paires de pôles que le paquet statorique ; ce dernier est appelé <secondaire de la machine>.

##### **I.3.1.1.Stator des machines asynchrones :**

Il est fixe et il porte à l'intérieur des encoches, un bobinage à  $p$  paires de Pôles dont l'une des extrémités aboutit à la source et l'autre à une plaque à bornes avec

laquelle on choisit le type de couplage : étoile ou triangle. (Voir les figures 1 et 2)

Pour les petites machines asynchrones, la carcasse moulée en alu sur l'empilage de tôles assure leur blocage et le refroidissement du circuit magnétique.

Pour les grosses machines asynchrones, la carcasse peut être en acier moulé ou en tôle d'acier roulé et soudé. Pour les diamètres supérieurs à 1 mm, les tôles magnétiques sont réalisées par secteurs et serrées entre elles par des rivets ; elles sont

centrées dans des nervures et maintenues par deux plateaux prenant appui sur des butées soudées.



**Figure 1 : Stator sans bobinage**



**Figure 2 : Stator avec bobinage**

#### **I.3.1.2. Rotor des machines asynchrones :**

Les rotors ou induits des moteurs asynchrones comportent un enroulement fermé en court-circuit, dont les conducteurs sont le siège des courants induits par le champ statorique.

L'enroulement rotorique se divise en deux classes :

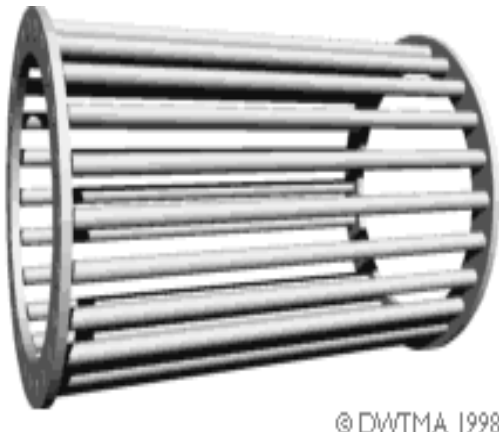
- > Les rotors à cage d'écureuil.
- > Les rotors bobinés à bagues.

Quel que soit le type employé, l'enroulement est fermé sur lui-même lorsque le moteur tourne. Le tambour du rotor est constitué par des disques encochés en tôle d'acier supérieur au silicium d'une épaisseur de 0,35 à 0,5 mm, ces disques sont recouverts d'une couche d'émail sur deux faces ou d'un mince papier collé sur une face, ou simplement oxydés pour les petits rotors.

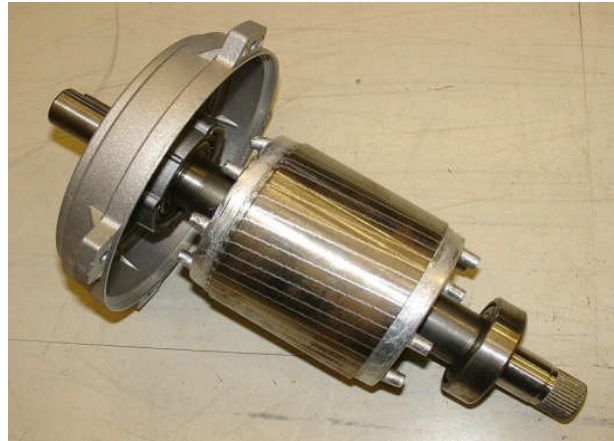
##### **a) Rotors à cage d'écureuil :**

Les rotors à cage d'écureuil des moteurs asynchrones sont constitués par un cylindre de tôles empilées, percées à la périphérie pour former des encoches. Ces encoches fermées ou semi-fermées sont destinées à recevoir le bobinage, qui est

constitué par des barres en cuivres nu, ou par de l'aluminium coulé sous pression à une température voisine de  $735^{\circ}\text{C}$ . Les cages en métal sont faites avec des barres d'égale longueur, enfilées dans les encoches et rivées ou brasées, parallèle de chaque côté du cylindre de tôles magnétiques, forment une cage solide au point de vue mécanique et de faible résistance électrique. (Voir figure les figures 3 et 4).



**Figure 3 : Cage d'écureuil**



**Figure 4 : Rotor à cage d'écureuil**

Les rotors à cage peuvent être classés en trois catégories :

- > Les cages simples, à barres rondes, carrées, rectangulaires.
- > Les cages à encoches profondes et de faibles largeurs.
- > Les cages doubles, superposées et reliées entre elles par une fente.

#### **b) Rotors bobiné :**

Le nombre de phases du rotor est indépendant de celui du stator. Quel que soit le nombre de phases de l'enroulement statorique, les rotors à bagues peuvent être bobinés en biphasé. L'enroulement biphasé convient pour les petites puissances et permet de simplifier l'appareillage. Malgré cet avantage, le bobinage triphasé est le plus généralement employé, car la puissance transmise par le rotor est proportionnelle au nombre de phase de celui-ci. Le rotor d'un moteur asynchrone se comporte comme le secondaire d'un transformateur.

En plus des organes électriques et magnétiques cités ci-dessus, la machine asynchrone comprend aussi des organes mécaniques telle que : Carcasse avec fixation, Ventilateur, L'arbre, Vis de fixation, Boites à bornes, Roulements à billes, Flasques...etc. (voir la figure 5).



**Figure 5 : Moteur asynchrone triphasé**

### **I.3.2.Principe de fonctionnement :**

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique des champs tournants.

Dés que le stator est alimenté par le réseau triphasé alternatif de pulsation ( $\omega_s$ ) et de fréquence ( $f_s$ ), un courant traverse ses enroulements et crée une force magnétomotrice ( $E$ ) variable, elle est donnée par la formule suivante :

$$E = n \cdot i \quad (\text{A.tr})$$

Avec :  $E$  Force magnétomotrice. ;

$i$  Courant du réseau.

$n$  Nombre de spires.

La loi d'Ampère stipule que, lorsqu'un conducteur est traversé par un courant, il produit un champ magnétique ( $H$ ), ce dernier est donné par la formule suivante :

$$H = \frac{n \cdot i}{l} \quad (\text{A.tr/min})$$

Avec :  $H$  champ magnétique.

$l$  Longueur moyenne des lignes de champ.

Ce champs magnétique ( $H$ ), crée à son tour une induction magnétique ( $B$ ) au niveau de l'entrefer, elle est donnée par la relation suivante :

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (\text{T})$$

Avec :  $\mu_0$  Perméabilité de l'air,  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  (A/m)

$B$  Induction magnétique.

Nous avons une autre grandeur importante qui est le flux magnétique, elle est donnée en fonction de l'induction magnétique par la relation suivante :

$$\phi = \iint \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (\text{Weber})$$

Lorsque le vecteur de l'induction magnétique  $B$  est perpendiculaire au palan du circuit, on aura :

$$\phi = B \cdot S \quad (\text{Weber})$$

Avec :  $S$  surface de l'armature magnétique de l'induit.

$\phi$  Le flux mutuelle sous un pôle.

Selon la loi de Faraday, la f.e.m aux bornes d'un circuit est égale la dérivé par rapport au temps du flux qui traverse chaque spires du circuit.

$$e = n \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{V})$$

On met quelque fois un signe (-) dans la formule pour rappeler que la f.e.m à un effet qui s'oppose à la cause qui lui donne naissance, cette effet d'opposition est précisé par la loi de Lenz.

Les deux lois sont générales et valables quelque soit la forme du circuit et la façon dont varie le flux.

Selon la loi de Laplace, la circulation du courant électrique ( $i$ ) dans un fil provoque une force élémentaire ( $dF$ ) exercée sur l'élément ( $dL$ ) du fil par une induction ( $B$ ).

Cette force élémentaire est donnée par la relation suivante :

$$dF = i \vec{dL} \wedge \vec{B}$$

L'intensité de cette force est donnée comme suit :

$$F = I \cdot B \cdot L \cdot \sin \alpha \quad (\text{N})$$

Avec :  $I$  courant induit.

$L$  Longueur du fil.

$\alpha$  Angle entre  $\vec{dL}$  et  $\vec{B}$ .

Cette force crée un couple de démarrage, ce couple fera tourner le rotor à une vitesse proche de la vitesse du champ tournant du stator ( $\omega_s$ ).

#### **I.4. Démarrage des moteurs asynchrones :**

Quel que soit le type du moteur utilisé, il est nécessaire au démarrage de limiter le courant d'appel et de conserver un couple de démarrage suffisamment important. Les procédés sont évidemment différents pour les moteurs à rotor bobinés ou pour les moteurs à rotor en court-circuit.

##### **I.4.1. moteur à rotor bobiné :**

Pour les moteurs de petites puissances, le démarrage s'effectue en insérant au rotor un rhéostat de démarrage qui permet de limiter l'appel en courant. Par contre les

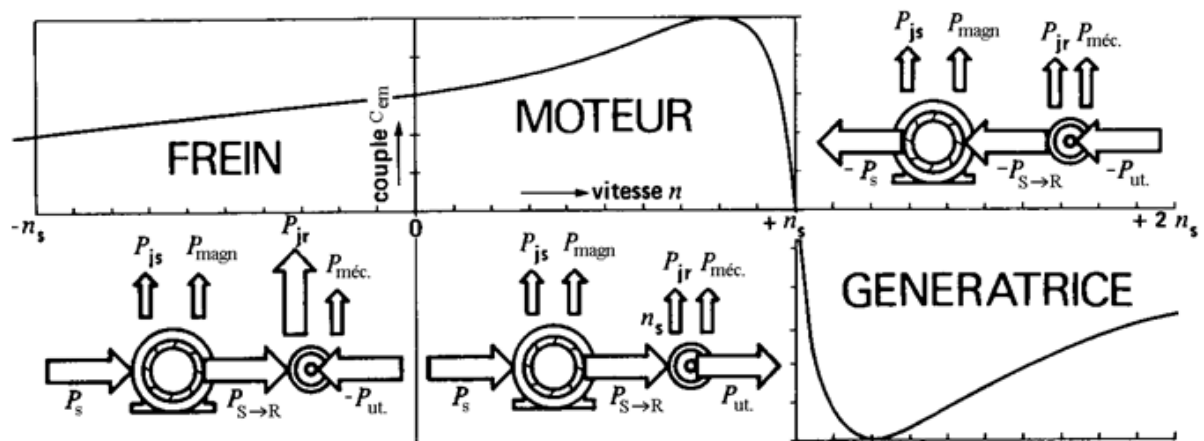
moteurs de grandes puissances, il s'effectue par récupération de la puissance fournie par les bobinages rotorique (cascade hypo synchrone).

#### **I.4.2. moteur à cage d'écureuil :**

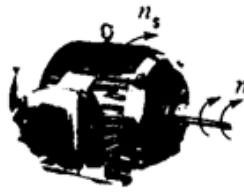
Les modes de démarrage de ce type de rotor sont des démarrages statoriques cité-ci-dessous :

- > Démarrage direct par application de la tension nominal.
- > Démarrage étoile triangle.
- > Démarrage par résistance ou par inductance.
- > Démarrage par autotransformateur.

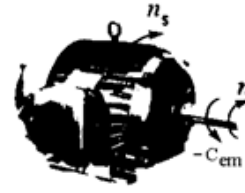
#### **Synthèse des modes de fonctionnement de la machine asynchrone :**



$C_{em}$  = couple développé  
par la machine



$n$  = sens de rotation  
de la machine



$n_s$  = sens de rotation  
du champ tournant

# Partie II

# Calcul



# **Chapitre I**

## **Dimensionnement du stator et du rotor**

### **I.1. Introduction :**

Dans ce chapitre, nous déterminerons les dimensions géométriques des différentes parties du moteur toutes en respectant les critères techniques et économiques exigés et en tenant compte des contraintes électromagnétiques.

### **I.2. Dimensionnement du stator :**

Le choix des dimensions principales du stator est basé sur :

- Choix du diamètre extérieur : Il est donné suivant le tableau A<sub>7</sub> (Voir Annexe II).
- Calcul du diamètre intérieure : Il est déduit de la relation suivante :  $D_1 = k_d \cdot D_{ext}$ . Le coefficient  $k_d$  est donné en fonction de pôles 2P Suivant le tableau A<sub>8</sub> (Voir Annexe II).

### a) Puissance électromagnétique :

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

$$P_e = K_e \cdot \frac{P_n}{\cos(\phi_n) \cdot \eta_n} \quad [\text{KVA}] \quad (\text{I.1})$$

Avec :  $P_n$  Puissance normale de la machine ;  $\cos(\phi_n)$  Facteur de puissance.

$\eta_n$  Rendement nominal de la machine ;

$K_e$  Coefficient qui tient compte de la chute de tension dans le stator, Il est donné en fonction du nombre de paires de pôles par l'expression suivante :

$$K_e = 0,98 - 5 \cdot p \cdot 10^{-3} \quad \text{Où : } P \quad \text{Nombre de paires de pôles.}$$

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

La longueur virtuelle de l'induit est la longueur de l'induit fictif présentant la même reluctance d'induit réel sans canaux de ventilation,  $L_i$  est donnée par la

formule suivante :

$$L_i = \frac{6,1 \cdot P_e \cdot 10^{12}}{\alpha_i \cdot K_f \cdot N_s \cdot D_1 \cdot A_1 \cdot B_\delta \cdot K_{enl}} \quad [\text{mm}]. \quad (\text{I.2})$$

Avec:  $\alpha_i$  Coefficient de recouvrement polaire;  $K_f$  Facteur de forme de la courbe d'induction ;  $B_\delta$  Induction dans l'entrefer ;  $A_1$  Charge linéaire.

$N_s$  Vitesse de rotation de synchronisme;  $D_1$  Diamètre intérieur du stator.

$K_{enl}$  Facteur de bobinage de l'enroulement statorique, il est donné par :

$$K_{enl} = K_{dl} \cdot K_{rl} \quad (\text{I.3})$$

$K_{d1}$  Coefficient de distribution, donné par :  $K_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m_1}\right)}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2m_1 q_1}\right)}$

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

$K_{r1} = \sin\left(\frac{\beta \cdot \pi}{2}\right)$  Où :  $\beta$  – Rapport de raccourcissement

- **Coefficient de longueur :**

Est le rapport entre la longueur virtuelle et le diamètre intérieur de la tôle du stator. Si  $\lambda_i$  est petit la machine aura un bon refroidissement et le montage des enroulements plus facile mais aura un grand diamètre donc un grand flux par rapport à la longueur, et cela induit consommation très élevée du cuivre. Lorsqu'il est élevée le moment d'inertie de la machine est plus petit à la quantité du cuivre pour les parties frontales est plus faible.

$$\lambda_i = \frac{li}{D_1} \quad (I.4)$$

- **Le pas polaire :**

C'est la distance entre deux axes de pôles voisins distincts, il est donné par :

$$\tau_{pl} = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}]. \quad (I.5)$$

Avec :  $P$  Nombre de paires de pôles.

- **Pas polaire en nombre d'encoche :**

$$\tau_p = \frac{Z_1}{2 \cdot p} \quad (I.6)$$

$Z_1$  – Nombre d'encoches statorique.

- **Pas dentaire :**

C'est la distance entre les axes de deux encoches voisines, il est donné par la relation suivante :

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{I.7})$$

- **Le nombre de bobines multiples :**

$$\text{Nbob} = \frac{Z_1}{2 \cdot q_1}$$

**c) Courant nominale :**

Il est donné par l'expression suivante :

$$I_{n1} = \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_{n1} \cdot \cos(\phi_n) \cdot \eta_n} \quad [\text{A}] \quad (\text{I.8})$$

Avec :  $m_1$  Nombre de phases statoriques ;  $U_{n1}$  Tension nominale.

**d) Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche :**

C'est le nombre de conducteur occupant une encoche. Il est donné par :

$$U_{enc1} = \frac{a_1 \cdot t_1 \cdot A_1 \cdot 10^{-3}}{I_{n1}} \quad (\text{I.9})$$

Avec :  $a_1$  Nombre de voies parallèles ;  $A_1$  Charge linéaire, [A/m].

**e) Nombre de spires d'une voie parallèle :**

C'est le nombre de spires que contient une phase statorique. Il est donné

par la formule suivante :

$$W_I = \frac{p \cdot q_1 \cdot U_{enc1}}{a_1} \quad (\text{I.10})$$

- **Angle électrique séparant deux encoches successives:**

$$\gamma = \frac{p \cdot 360}{Z_1} \quad (\text{I.11})$$

- **L'angle entre deux parois de l'encoche :**

$$\theta = \frac{p \cdot q_1 \cdot U_{enc1}}{a_1}$$

- **La zone de phase :**

$$\alpha = q_1 \cdot \gamma$$

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

$$q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m_1} \quad (\text{I.12})$$

- **Pas d'enroulement :**

C'est la distance entre les cotés actifs de deux sections qui se suivent.

$$y_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p} - \varepsilon \quad (\text{I.13})$$

$$\varepsilon \quad \text{Raccourcissement} \quad \varepsilon = 0$$

#### **f) Section effective transversale d'un conducteur de l'enroulement :**

Elle est calculée par l'expression suivante :

$$S_{eff} = \frac{I_{n1}}{a_1 \cdot J_1} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{I.14})$$

$J_1$  Densité du courant dans l'enroulement statorique, elle varie entre (2 ÷ 14) [A/mm<sup>2</sup>].

NB : Si la section effective calculée est supérieure à 1,8mm<sup>2</sup> on doit diviser celle-ci en sections élémentaires, et comme la section des conducteurs est normalisée, on choisira la section standard la plus proche de celle calculée.

$$S_{el} = S_{eff} / N_{el} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{I.15})$$

$$N_{el} \quad \text{Nombre de conducteurs élémentaires.}$$

Les sections normalisées sont données par le tableau  $A_1$  (voir l'annexe)

### **I.3. Dimensionnement de la feuille statorique:**

La feuille statorique est représentée par la figure 6-a :

- a) Largeur de la dent :**

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

$$b_{z1} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{z1\max}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{I.16})$$

Où :  $K_{fer}$  Coefficient de remplissage du paquet de tôle statorique et rotorique.

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

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

$B_{z1\max}=1.95(\text{T})$  Induction maximale dans la dent statorique en [T].

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

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

$$h_{c1} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{c1}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{I.17})$$

$B_{c1}=1.55(\text{T})$  Induction magnétique dans le dos du stator.

#### **c) Hauteur de la dent:**

La hauteur de la dent est donnée par l'expression suivante :

$$h_{z1} = 0.5(D_{\text{ext1}} - D_1) - h_{c1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{I.18})$$

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

La largeur minimale de l'encoche est donnée par l'expression suivante :

$$b_{enc11} = \frac{\pi \cdot (D_1 + 0.2 \cdot h_{z1})}{Z_1} - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{I.19})$$

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

La largeur maximale de l'encoche est donnée par la formule suivante :

$$b_{enc12} = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2h_{z1})}{Z_1} - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{I.20})$$

#### **f) La hauteur de la clavette :**

$$h_{kl} = 0.6 \quad [\text{mm}]$$

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

La hauteur de l'encoche est donnée par la formule suivante :

$$h_{enc1} = h_{z1} - h_{f1} - h_{k1} - \frac{b_{enc12}}{2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{I.21})$$

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

$h_{k1}$  Hauteur de la clavette.

**h) Section de l'encoche statorique:**

La section occupée par les conducteurs logés dans les encoches statoriques, elle est donnée par la relation suivante :

$$S_{enc1} = 0.5 \cdot (b_{enc11} + b_{enc12}) \cdot h_{enc1} + \frac{\pi \cdot b_{enc12}^2}{8} - S_{iso} \quad [\text{mm}] \quad (\text{I.22})$$

$S_{iso}$  Section occupée par l'isolation

$$S_{iso} = 0.5 \left( \pi \cdot \frac{b_{enc12}^2}{2} + 2 \cdot h_{enc1} + b_{enc11} \right) \cdot e_1 \quad [\text{mm}] \quad (\text{I.23})$$

$e_1$  Epaisseur de l'isolant.

**i) Coefficient de remplissage :**

Le coefficient de remplissage est défini comme étant le rapport de la section des conducteurs occupants l'encoche à la section utile de l'encoche, il doit varier dans l'intervalle (0.7 ÷ 0.75), il est donnée par l'expression suivante :

$$K_{r1} = N_{elt} \cdot \frac{d_{iso}^2}{S_{enc1}} \quad (\text{I.24})$$

Avec :  $N_{elt} = N_{el} \cdot U_{enc1}$

$d_{iso}$  Diamètre de conducteurs avec isolation ;  $S_{enc1}$  Section de l'encoche en  $[\text{mm}^2]$ .

### j) Vérification des charges électromagnétique :

Après avoir calculé le nombre de conducteurs effectifs dans une encoche et choisi la section normalisée, on passera à la vérification de la charge linéaire  $A_l$ , l'induction  $B_\delta$  et du flux  $\phi$ .

La différence relative entre la valeur vérifiée et la valeur préliminaire ne doit pas dépasser les 10%.

- **Charge linéaire :**

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

$$A_l = \frac{I_{nl} \cdot U_{enc1} \cdot Z_1}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1 \cdot 10^{-3}} \quad [\text{A/m}] \quad (\text{I.25})$$

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

L'induction magnétique dans l'entrefer caractérise l'utilisation électromagnétique.

$$B_\delta = \frac{\phi}{\alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot L_i \cdot 10^{-6}} \quad [\text{T}]. \quad (\text{I.26})$$

- **Flux sous un pôle :**

$$\phi = \frac{U_{n1} \cdot K_e}{4 \cdot K_f \cdot f_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad [\text{Weber}]. \quad (\text{I.27})$$

### k) Choix de l'entrefer :

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



## **I.4. Dimensionnement de la feuille rotorique :**

### **I.4.1. Introduction :**

Le rotor est à cage d'écureuil, celle-ci est constituée de barres logées dans les encoches ovales semi-ouvertes, court-circuitées à leurs extrémités.

La cage d'écureuil peut être présentée comme un enroulement polyphasé dont le nombre de paires de pôles est égale au nombre de paires de pôles du champ tournant.

#### **a) Choix du nombre d'encoches rotorique :**

Pour éviter les couples parasites et les couples de vibration créés par les harmoniques des forces magnétomotrices et le bruit magnétique qui est créé par l'attraction entre les dents du stator et les dents du rotor, ainsi que la pulsation périodique du flux, on doit choisir le nombre d'encoches du rotor différent de celui du stator ; ( $Z_1 \neq Z_2$ ).

#### **b) Diamètre extérieur du rotor :**

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

$$D_2 = D_1 - 2\delta \quad [\text{mm}]. \quad (\text{I.28})$$

Où :  $\delta = 0.3$  (mm)    Epaisseur de l'entrefer.

#### **• Pas dentaire rotorique :**

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

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{I.29})$$

Avec :  $Z_2$     Nombre d'encoches rotorique.

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

#### **c) Courant dans la barre :**

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

$$I_2 = 1,11 \cdot \frac{I_{n1} \cdot m_1 \cdot K_{en1} \cdot W_1 \cdot \cos(\phi_n)}{m_2 \cdot W_2 \cdot K_{en2}} \quad [\text{A}]. \quad (\text{I.30})$$

Le rotor de notre machine est à cage d'écureuil, on considère que cette cage est un enroulement polyphasé à nombre de phase  $m_2$  égal au nombre d'encoche  $Z_2$ . Donc  $K_{en2}=1$  et  $W_2=0.5$ , dans ce cas on aura :

$$I_2 = 1,11 \cdot I_{n1} \cdot 2 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot \cos(\phi_n) \cdot \frac{K_{en1}}{Z_2} \quad [\text{A}]. \quad (\text{I.31})$$

Avec :  $I_{n1}$  Courant nominal statorique ;  $W_1$  Nombre de spires statoriques.

$K_{en1}$  Facteur de bobinage statorique.

#### **I.4.2.Dimensionnement du rotor :**

La feuille rotorique est représentée par la figure 7.a.

##### **a) Hauteur de la culasse rotorique :**

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

$$h_{c2} = 0,5 \cdot \frac{\alpha_i \cdot \tau_{p2} \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{c2}} \quad [\text{mm}]. \quad (\text{I.32})$$

$B_{c2} = 1,2(\text{T})$  Induction dans la culasse rotorique

##### **• Pas polaire rotorique :**

$$\tau_{p2} = \pi \cdot \frac{D_2}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}] \quad (\text{I.33})$$

##### **b) Hauteur de la dent :**

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

$$h_{z2} = 0,5 \cdot (D_2 - D_{int2}) - h_{c2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{I.34})$$

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

$D_{int2}=37(\text{mm})$  diamètre intérieur du rotor en [mm].

**c) Largeur de la dent :**

La largeur de la dent est exprimée par l'expression suivante :

$$b_{z2} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{z2\max}} \quad [\text{mm}]. \quad (\text{I.35})$$

$B_{z2\max} = 1.75(T)$  Induction admissible dans la dent rotorique en [T].

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

Le diamètre supérieur de l'encoche est exprimé par l'expression suivante :

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

Avec :  $h_{f2} = 0.7$  (mm) Hauteur de la fente de l'encoche rotorique.

$b_{z2}$  Largeur de la dent.

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

Le diamètre inférieur de l'encoche est exprimé par l'expression suivante :

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

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

La hauteur de l'encoche est donnée comme suit :

$$h_{enc2} = h_2 + 0.5 \cdot (d_{21} + d_{22}) \quad [\text{mm}]. \quad (\text{I.38})$$

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

$$h_2 = h_{z2} - h_{f2} - 0.5 \cdot (d_{21} + d_{22}) \quad [\text{mm}]. \quad (\text{I.39})$$

**g) Cage rotorique :**

Elle est constituée des barres d'aluminium logées dans des encoches ovales semi-ouvertes court-circuitées à leurs extrémités par deux anneaux.

- **Section de la barre :**

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

$$S_b = 0.125 \cdot (d_{21}^2 + d_{22}^2) \cdot \pi + 0.5 \cdot (d_{21} + d_{22}) \cdot h_2. \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{I.40})$$

- **Densité du courant :**

C'est le rapport entre le courant et la section de la barre traversée par ce dernier.

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

La valeur de  $J_b$  comprise entre  $[2.5 \div 3.5]$

### **I.5.Dimensionnement de l'anneau de court-circuit:**

Le dimensionnement de l'anneau se fait comme suit :

- **Section de l'anneau :**

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

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

- **Hauteur de l'anneau :**

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

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

- **Largeur de l'anneau :**

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

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

- **Diamètre moyen intérieur de l'anneau :**

Le diamètre moyen de l'anneau s'exprime comme suit:

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

- **Densité de courant dans l'anneau :**

Elle s'exprime comme suit :

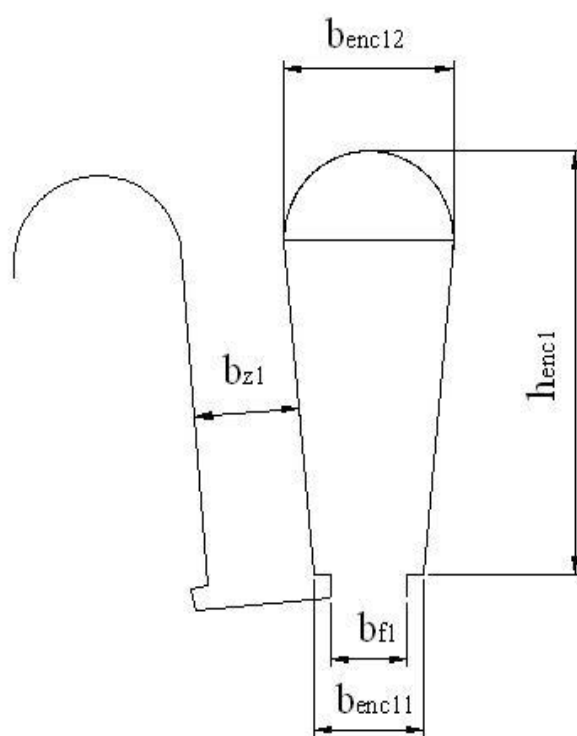
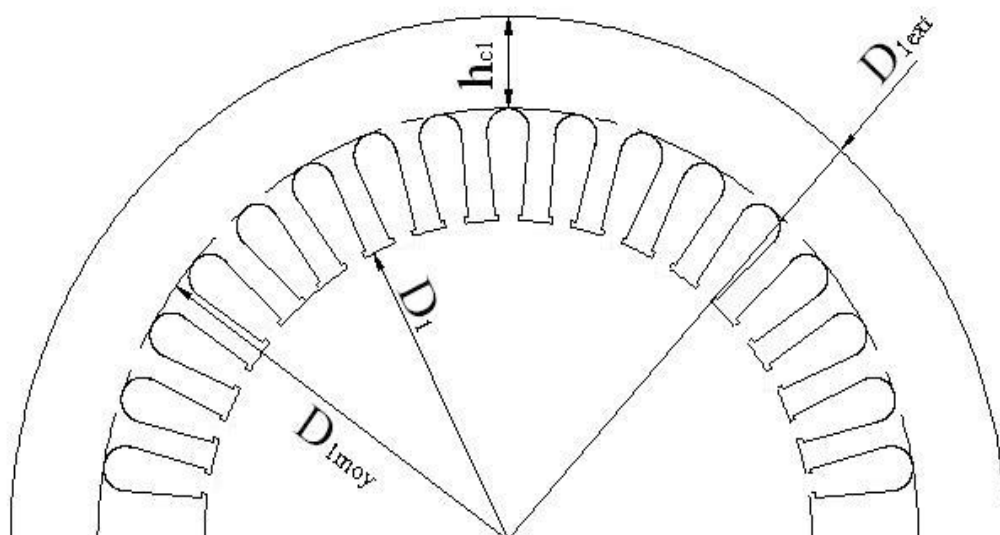
$$J_{an} = \frac{I_{an}}{S_{an}} \quad [\text{A/mm}^2]. \quad (\text{I.46})$$

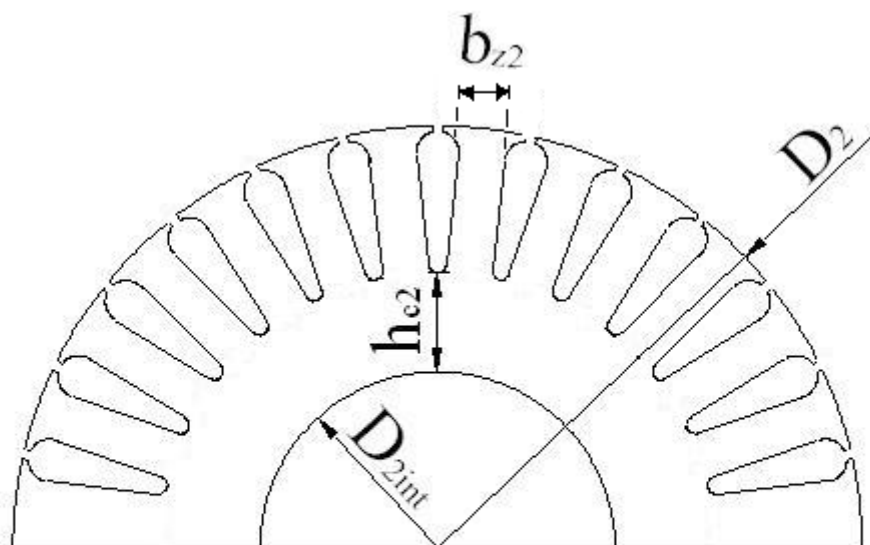
Avec :  $I_{an}$  Courant dans l'anneau, il est donné par la relation suivante :

$$I_{an} = \frac{I_b}{K_{red}} \quad [\text{A}] \quad (\text{I.47})$$

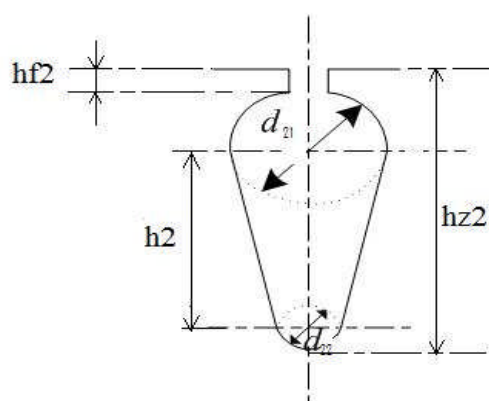
$K_{red}$  Coefficient de réduction Qui est donné par l'expression suivante :

$$K_{red} = 2.\pi.\frac{P}{Z_2} \quad (\text{I.48})$$





**Fig 7.a Feuille rotorique**



**Fig 7.b Encoche rotorique ovale semi-ovale**

## **CHAPITRE II**

### **Calcul du circuit magnétique :**

#### **II.1.Introduction:**

Le circuit magnétique des machines à courant alternatif, et les machines asynchrones en particulier, doit canaliser les lignes de forces du champ magnétique tournant. L'objet de ce calcul consiste à déterminer les forces magnétomotrices (fmm) qui nous permettra de calculer le courant magnétisant et de déduire par la suite la réactance magnétique. Le principe de calcul est basé sur la loi générale de la circulation du champ magnétique.

Dans notre cas,  $\oint H \cdot dl$  représente la somme  $\sum H_x \cdot l_x$

Où :  $H_x$  Représente l'intensité du champ magnétique correspondant à l'induction dans le tronçon x.

$l_x$  Représente la ligne moyenne du tronçon choisi.

Le calcul du champ magnétique sera fait pour une paire de pôles. Le circuit magnétique de la machine asynchrone est constitué de cinq parties distinctes :

- Entrefer.
- La culasse statorique.
- La culasse rotorique.
- Les dents statorique.
- Les dents rotorique.

#### **II.2. Circuit magnétique statorique :**

Pour déterminer les intensités du champ magnétique dans les différentes parties de la machine, il faut au préalable calculer les inductions dans les différents tronçons du circuit magnétique.



**a) Induction dans la dent du stator :**

L'induction dans la dent statorique est déterminée par la conservation du flux à travers le pas dentaire, elle est donnée par la relation suivante :

$$B_{Z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1}{K_{fer} \cdot b_{Z1}} \quad [T] \quad (II.1)$$

**b) Longueur moyenne des lignes de champs dans la culasse statorique :**

Elle est donnée par l'expression suivante :

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

**c) Force magnétomotrice de la culasse statorique :**

Elle est donnée par :

$$F_{c1} = H_{c1} \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (II.3)$$

Avec :  $H_{c1}$  Intensité du champ magnétique dans la culasse statorique qui correspond à l'induction  $B_{c1}$ ,  $H_{c1}$  est déterminé de la courbe  $H_{c1} = f(B_{c1})$ . Représenté dans le tableau A<sub>2</sub>. (Voir l'annexe II).

**d) Force magnétomotrice dans la dent du stator :**

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{z1} = H_{z1} \cdot h_{z1} \cdot 10^{-3} \quad [A]. \quad (II.4)$$

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

$H_{z1}$  : Intensité du champ magnétique qui correspond à l'induction  $B_{z1}$ , déterminée du tableau A<sub>3</sub> (voir l'annexe II).

**II.3. Circuit magnétique rotorique :**

Pour le calcul du circuit magnétique on suit les étapes ci-après :

#### a) Induction dans la dent du rotor :

L'induction dans la dent du rotor est déterminée par la loi de conservation du flux à travers le pas dentaire rotorique, elle est donnée par l'expression suivante :

$$B_{z2} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot b_{z2}}$$

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

Elle est donnée par la formule suivante :

$$L_{c2} = (D_2 - 2 \cdot h_{z2} - h_{c2}) \cdot \pi / 2 \cdot p + h_{c2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.5})$$

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

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

#### c) Force magnétomotrice dans la culasse du rotor :

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{c2} = H_{c2} \cdot L_{c2} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (\text{II.6})$$

$H_{c2}$  : Intensité du champ magnétique dans la culasse rotorique qui correspond à l'induction  $B_{c2}$ . (voir le tableau  $A_2$  en annexe II).

#### d) Force magnétomotrice dans les dents du rotor :

Pour le type d'encoche représenté dans la figure 5.b on a :

$$F_{z2} = H_{z2} \cdot (h_{z2} - 0,4 \cdot d_{22}) \quad [\text{A}] \quad (\text{II.7})$$

$H_{z2}$  Intensité du champ magnétique dans la dent rotorique qui correspond à l'induction  $B_{z2}$  (voir le tableau  $A_3$ , Annexe II).

### II.4. Force magnétomotrice dans l'entrefer :

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

$$F_\delta = 0,8 \cdot B_\delta \cdot K_\delta \cdot \delta \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (\text{II.8})$$

Avec :  $K_\delta$  Coefficient de CARTER qui tient compte du non- uniformité de l'entrefer, due aux ouvertures des encoches statoriques et rotoriques. Il est donné par la relation suivante :

$$K_\delta = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + (5 \cdot \delta \cdot t_1 / b_{f1})} \quad (\text{II.10})$$

$$K_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{f2}}{t_2 - b_{f2} + (5 \cdot \delta \cdot t_2 / b_{f2})} \quad (\text{II.11})$$

$b_{f1}$  et  $b_{f2}$  Sont respectivement les largeurs des fentes des dents statorique et rotorique en [mm].

## II.5. Force magnétomotrice totale par paire de pôle :

La force magnétomotrice totale est la somme des forces magnétomotrices partielles du circuit, Elle est donnée par la formule suivante :

$$F = \sum F_i = 2 \cdot (F_\delta + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2} \quad [\text{A}] \quad (\text{II.12})$$

Le numéro 2 est du au fait que l'entrefer, les dents statorique et rotorique sont parcourus deux fois par les lignes de champs magnétique.

## II.6. Coefficient de saturation :

Il existe deux principaux coefficients de saturation :

### a) Coefficient de saturation des dents :

Il est donnée par :

$$K_{\mu z} = \frac{F_\delta + F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} \quad (\text{II.13})$$

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

Il est donnée par :

$$K_\mu = \frac{\sum F_i}{2 \cdot F_\delta} < 1,7 \quad (\text{II.14})$$

## II.7. Courant magnétisant :

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

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot \sum F_i}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{enl}} \quad [\text{A}]. \quad (\text{II.15})$$

## II.8. Réactance de magnétisation :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$X_m = \frac{K_e \cdot U_{n1}}{I_{\mu}} \quad [\Omega] \quad (\text{II.16})$$

$K_e$  Facteur de majoration, il varie entre 0.9 et 0,98.

## II.9. Coefficient de dispersion magnétique du stator :

Il est donnée par :

$$\sigma_{\mu} = \frac{X_1}{X_m} < 0.05 \quad (\text{II.17})$$

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

$$X_1 = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2 \cdot \lambda_1}{P \cdot q_1 \cdot 10^8}$$

## II.10. Force électromotrice à vide $E_o$ :

Elle est donnée par :

$$E_o = \frac{U_{n1}}{(1 + \sigma_{\mu})} \quad [\text{V}]. \quad (\text{II.18})$$

# CHAPITRE III

## Calcul des paramètres et des performances

### III.1. Calcul des paramètres :

#### III.1.1. Introduction :

Pour pouvoir déterminer les caractéristiques de la machine on procédera au calcul de tous les paramètres suivants ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $R_{2\text{dem}}$ ,  $X_{2\text{dem}}$ ).

#### III.1.2. Paramètres statoriques :

On calcul les paramètres statoriques comme suit :

##### III.1.2.1. Résistance active d'une phase du stator :

$$R_1 = \rho_{cu}(T) \frac{W_1 \cdot L_{w1} \cdot 10^{-3}}{a_1 \cdot N_{el} \cdot S_{elt1}} \quad [\Omega] \quad (\text{III.1})$$

Avec :  $S_{elt1}$  Section standard d'un conducteur élémentaire.

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

Elle est donnée pour :

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

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

$L_{w1}$  – Longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique, calculé

$$\text{Comme suit : } L_{w1} = 2 \cdot (L_i + L_{f1}). \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.2})$$

Où :  $L_i$  – Longueur virtuelle de l'induit.

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

$$L_{f1} = (1.16 + 0.14 \cdot p) \cdot b_{1\text{moy}} + 15 \quad [\text{mm}]. \quad (\text{III.3})$$

$b_{1\text{moy}}$  – Largeur moyenne d'une section.

$$b_{1\text{moy}} = \frac{\pi \cdot (D1 + h_{z1}) \cdot Y_{1\text{moy}}}{Z_1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.4})$$

$Y_{1\text{moy}}$  – Pas moyen d'un groupe de section.

### III.1.2.2. Réactances de fuites et perméances de fuites du stator :

La réactance de fuite globale du stator comprend :

- **Réactance de fuite d'encoche :**

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

$$X_{enc1} = \frac{1,58.f_1.L_i.W_1^2}{q_1.P.10^8}.\lambda_{enc1} \quad [\Omega] \quad \textbf{(III.5)}$$

- **Réactance de fuite différentielle :**

C'est le résultat des flux suivants :

-Flux de fuite de dent à dent à travers l'entrefer.

-Flux différentielle de phase.

-Flux différentielle de l'encoche.

Elle est donnée par :

$$X_{1d} = \frac{1,58.L_i.f_1.W_1^2}{P.q_1.10^8}.\lambda_{1d} \quad [\Omega] \quad \textbf{(III.6)}$$

- **Réactance de fuite frontale :**

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

Elle est donnée par :

$$X_{1f} = \frac{1,58.f_1.L_i.W_1^2}{q_1.P.10^8}.\lambda_{1f} \quad [\Omega] \quad \textbf{(III.7)}$$

La réactance totale est donnée par :

$$X_1 = 1,58.f_1.L_i.W_1^2 \cdot \frac{\lambda_1}{p.q_1.10^3} \quad [\Omega]. \quad \textbf{(III.8)}$$

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

$$\lambda_1 = \lambda_{enc1} + \lambda_{1d} + \lambda_{1f} \quad (\text{III.9})$$

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

$$\lambda_{enc1} = \frac{h_1}{3b_{enc12}} \cdot K_{b1} + \left( \frac{h_{11}}{b_{enc12}} + \frac{3h_{k1}}{b_{enc12} + 2b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot K_{b2} \cdot \quad (\text{III.10})$$

$K_{b1}, K_{b2}$  Coefficients donnée suivant la figure 1.6 (voir annexe).

$K_{b1}=K_{b2}=1$  pour l'enroulement concentrique.

$\lambda_{1d}$  Perméance différentielle proportionnelle à la réactance de fuite différentielle. Elle est donnée par la formule suivante :

$$\lambda_{1d} = \frac{0,9.t_1.(q_1.K_{en1})^2}{K_\delta.\delta} \cdot K_{rr1} \cdot K_{dd1} \cdot K_{r1} \quad (\text{III.11})$$

$$K_{r1} = 1 - \frac{0,033.b_{f1}^2}{\delta.t_1} \quad (\text{III.12})$$

Où :  $K_{rr1}$  Coefficient qui dépend de  $Q_1$  donnée par le tableau A<sub>4</sub> (voir l'annexe II).

$K_{dd1}$  Coefficient de fuite différentielle donnée par le tableau A<sub>5</sub> en fonction de  $\frac{Z_2}{p}$  et  $Q_1$  (voir l'annexe II).

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

$$\lambda_{1f} = 0,34 \cdot \frac{q_1.(L_{f1} - 0,64.\beta.\tau_{p1})}{L_i} \quad (\text{III.13})$$

### III.1.3. Paramètres rotorique

#### III.1.3.1. Calcul de la résistance rotorique :

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

Pour le type d'encoche présenté dans la figure 7.b on a :

$$R_b = \rho_{al}(T) \cdot \frac{L_i}{S_b} \cdot 10^3 \quad [\Omega]. \quad (\text{III.14})$$

Pour :  $T=20^\circ\text{C}$   $\rho_{al}(T)=28.10^{-9}$   $[\Omega.m]$ .

$T=115^\circ\text{C}$   $\rho_{al}(T) = 48,8.10^{-9}$   $[\Omega.m]$ .

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

### b) Résistance de l'anneau :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{an} = \frac{\rho_{al}(T) \cdot 2\pi \cdot D_{an} \cdot 10^{+3}}{Z_2 \cdot S_{an}} \quad [\Omega]. \quad (\text{III.15})$$

Avec :  $S_{an}$  Section de l'anneau en  $[\text{mm}^2]$  ;  $D_{an}$  Diamètre moyen de l'anneau en  $[\text{mm}]$ .

### c) Résistance de l'anneau ramenée a la barre :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{anram-b} = \frac{R_{an}}{(K_{red})^2} \quad [\Omega]. \quad \text{Avec : } K_{red} = 2\pi \frac{P}{Z_2} \quad (\text{III.16})$$

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

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{anram-s} = M \cdot R_{an-ram-b} \quad [\Omega]. \quad (\text{III.17})$$

$$M = \frac{4 \cdot m_1}{Z_2} \cdot \left( \frac{W_1 \cdot K_{en1}}{K_{ob}} \right)^2 \quad (\text{III.18})$$

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

$$K_{ob} = \frac{\sin\left(\frac{\alpha_{ob}}{2}\right)}{\left(\frac{\alpha_{ob}}{2}\right)} \quad (\text{III.19})$$



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

$$\alpha_{ob} = \frac{2\pi \cdot p \cdot \beta_{ob}}{Z_2} \quad [\text{rad}] \quad (\text{III.20})$$

M Coefficient de réduction de la cage rotorique vers le stator.

$$\beta_{ob} = \frac{t_1}{t_2} \quad (\text{III.21})$$

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

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

Elle représente la somme des résistances de la barre et celle de l'anneau ramenée à la barre. Pour notre type d'encoche Elle est donnée comme suit :

$$R_2 = R_b + R_{anram-b} \quad [\Omega]. \quad (\text{III.22})$$

#### f) Résistance d'une Phase rotorique ramenée au stator :

Pour notre type d'encoche elle est donnée comme suit :

$$R_{2ram} = M \cdot R_2 \quad [\Omega]. \quad (\text{III.23})$$

### III.1.3.2. Réactance de dispersion et perméance du rotor:

Dans cette partie, on a à calculer :

- La réactance de fuite d'encoche, due au flux de fuite qui se renferme autour des conducteurs.
- La réactance frontale; (la partie de l'enroulement située dans l'air à chaque extrémité du paquet de tôles).
- La réactance due au flux différentiel dont la valeur est très élevée dans un entrefer faible.

Et dans le type d'encoche représenté dans la figure 5.b on distingue aussi :

- La réactance de fuite due à l'induction dans les encoches.
- La réactance de dispersion globale est donnée par la formule suivante :

$$X_2 = 7,9.f_1.L_2.\lambda_2.10^{-9} \quad [\Omega] \quad (\text{III.24})$$

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

$$\lambda_2 = \lambda_{2enc} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob} \quad (\text{III.25})$$

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

On procède au calcul des différentes perméances :

- **Perméance d'encoche :**

$$\lambda_{2enc} = C_\lambda + \left( \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \right). \quad (\text{III.26})$$

$$\text{Avec : } C_\lambda = \psi \left[ \left( \frac{(h_2 + 0,4d_{22})}{3.d_{21}} \right) \left( \frac{(1 - \pi.d_{21})}{8.S_b} \right)^2 + 0,66 - \left( \frac{b_{f2}}{2.d_{21}} \right) \right] \quad (\text{III.27})$$

$\psi$  Représenté dans la figure 1.7

Pour le régime nominal on a  $\psi = 1$ .

- **Perméance différentielle :**

$$\lambda_{2d} = \frac{0,9.t_2.(Z_2/6.p)^2}{\delta.K_\delta}.K_{dd2} \quad (\text{III.28})$$

$K_{dd2}$  Coefficient de fuite différentielle donné en fonction de  $q_2$ , voir figure 2.1 (Annexe III)

L'équation qui correspond à l'allure de la courbe est donnée par :

$$K_{dd2} = \frac{9,15}{100.(Z_2/6.p)^2} \quad (\text{III.29})$$

- **Perméance frontale :**

$$\lambda_{2f} = \frac{2,3.D_{anmoy}}{Z_2.L_i.(K_{red})^2} \log \left( \frac{4,7.D_{anmoy}}{2.(h_{an} + b_{an})} \right) \quad (\text{III.30})$$

- **Perméance d'inclinaison d'encoches rotorique :**

$$\lambda_{ob} = \frac{t_2 \cdot \beta_{ob}}{9,5 \cdot \delta \cdot K_\delta \cdot K_\mu} \quad (\text{III.31})$$

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

### III.1.3.3. Réactance du rotor ramenée au stator :

Pour le type d'encoche présenté dans la figure 6.b on a :

$$X_{2ram} = M \cdot X_2 \quad [\Omega] \quad (\text{III.32})$$

### III.1.4. Paramètres de démarrage:

Pour un moteur asynchrone à cage d'écureuil, rotor immobile, les barres de la cage sont soumises à un champ tournant de fréquence d'alimentation ( $f_1=50$  Hz); la profondeur de pénétration du courant est alors faible (effet refoulement des courants) ; seule la partie supérieure des barres est le siège des courants induits d'où une forte résistance de la cage au démarrage.

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

#### a) Profondeur de pénétration :

La profondeur de pénétration du courant dans la barre rotorique est donnée par la relation suivante :

$$h_{pp} = \frac{h_b}{1 + \varphi} \quad [\text{mm}]. \quad (\text{III.33})$$

Où :  $h_b$  Hauteur de la barre  $\varphi$  Coefficient qui dépend de la valeur de  $\xi$ , il est donné par la courbe de la figure 1.7 (Voir Annexe III).

$$\xi = 0,064 \cdot h_b \sqrt{g} \quad \text{Pour } T=115^\circ \quad (\text{III.34})$$

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

Elle est donnée par :

$$b_{pp} = d_{21} - [(d_{21} - d_{22}) / h_2] (h_{pp} - d_{21} / 2) \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.35})$$

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

Elle est donnée par :

$$S_{b\text{dem}} = (\pi d_{21}^2 / 8) + [0,5 (d_{21} + b_{pp}) (h_{pp} - 0,5 d_{21})] \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III.36})$$

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

Pour le type d'encoche donnée en figure 7.b on a :

$$R_{b\text{dem}} = R_b \cdot K_{\text{dep}} \quad [\Omega] \quad (\text{III.37})$$

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

$$K_{\text{dep}} = \frac{S_b}{S_{b\text{dem}}} \quad (\text{III.38})$$

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

Elle est donnée comme suit :

$$R_{2\text{dem}} = R_{\text{anram-b}} + R_{b\text{dem}} \quad [\Omega] \quad (\text{III.39})$$

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

Elle est donnée par :

$$R_{2\text{dem-ram}} = M \cdot (R_{\text{anram-b}} + R_{b\text{dem}}) \quad [\Omega] \quad (\text{III.40})$$

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

Pour le type d'encoche donnée en figure 7.b on a :

$$X_{2\text{dem}} = 7,9 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot \lambda_{2\text{dem}} \cdot 10^{-9} \quad [\Omega] \quad (\text{III.41})$$

$X_{2\text{dem}}$  Réactance de dispersion du rotor au démarrage

$$\lambda_{2\text{dem}} = \lambda_{2\text{encdem}} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{0b} \quad (\text{III.42})$$

$\lambda_{2dem}$  Perméance de dispersion du rotor au démarrage Seule la perméance d'encoche qui est affectée par l'effet de refoulement du courant.

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

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

Pour notre type encoches :

$$X_{2demram-s} = M. X_{2dem} \quad [\Omega] \quad (\text{III.43})$$

### **III.1.5. Calcul de la masse :**

#### **III.1.5.1. Calcul du moment d'inertie dynamique :**

$$J_{id} := 0.65 \cdot D_2^4 \cdot L_i \cdot 10^{-12} \quad (\text{III.44})$$

#### **III.1.5.2. Calcul de conducteur isolé de l'enroulement :**

$$T_{1moy} := \pi \cdot \frac{D_1 + h_{enc1}}{Z_1}$$

$$Y_{1moy} = \tau_p ; b_{1moy} = T_{1moy} \cdot Y_{1moy} ; L_{1moy} = 2 \cdot (L_i \cdot L_{f1})$$

$$C = 2 ; \quad S = 0.245 \quad (\text{mm})^2$$

C Nombre de conducteurs élémentaire ; C équivaut à  $N_{el}$ .

S La section d'un conducteur sans isolation ; S équivaut à  $S_{elt1}$ .

$$M_{cu} := \left[ 7.55 + 1.35 \left( \frac{d_{iso}}{d_{nu}} \right)^2 \right] \cdot Z_1 \cdot \frac{U_{en1}}{2} \cdot L_{1moy} \cdot C \cdot S \cdot 10^{-6} \quad (\text{Kg}) \quad (\text{III.45})$$

#### **III.1.5.3. Calcul de la masse de l'aluminium de l'enroulement à cage du rotor :**

$$M_{al2} := 2.7 \cdot (Z_2 \cdot L_i \cdot S_b + 2 \cdot \pi D_{an} \cdot S_{an}) \cdot 10^{-6} \quad (\text{Kg}) \quad (\text{III.46})$$

#### III.1.5.4. Calcul de la masse du noyau statorique et rotorique :

$$M_{12} = 7.8.Li. K_{fer}. [0.785. (D_{ext1}^2 - D_2^2) - Z_1.S_{enc1} - Z_2. S_b]. 10^{-6} \text{ (Kg)} \quad \textbf{(III.47)}$$

### III.2. Calcul des performances

#### III.2.1.Introduction :

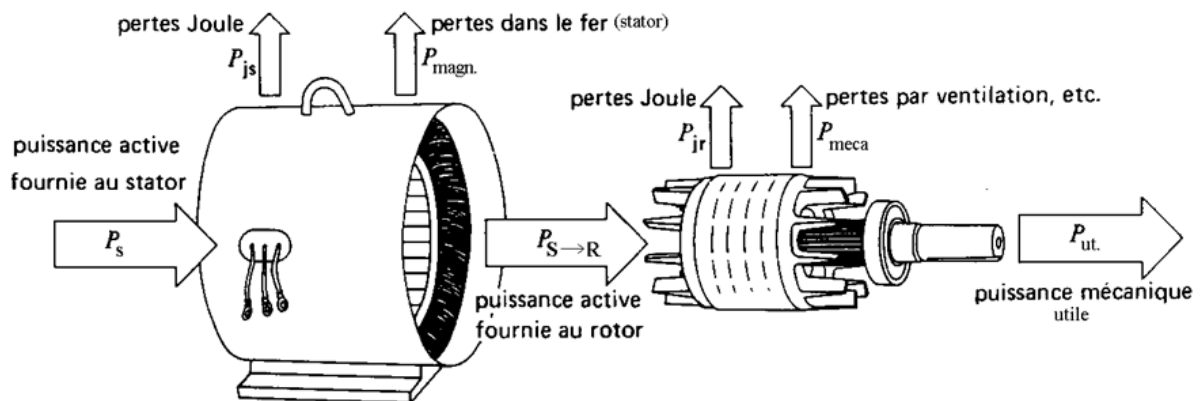
La transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique s'accompagne inévitablement de perte d'énergie dans les différentes parties du moteur telles que le circuit magnétique, les enroulements statorique et rotorique, ainsi que les différentes parties mécaniques. L'étude quantitative des pertes nécessite la connaissance parfaite de la distribution du courant électrique et du champ magnétique dans les différents tronçons de la machine.

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

On distingue quatre types de pertes :

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

#### Bilan des puissances :



### III.2.2. Pertes principales dans le fer :

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

#### a) Pertes dans les dents :

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{fz1} = 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot B_{z1\max}^2 \cdot G_{z1} \quad [W] \quad (III.48)$$

Avec :  $P_{1/50} := 2,5 \quad [W.Kg^{-1}]$  pour l'acier 2013

$$G_{z1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot [h_{z1} \cdot \pi \cdot (D_1 + h_{z1}) - S_{enc1} \cdot Z_1] \quad [Kg] \quad (III.49)$$

$G_{z1}$  Poids des dents statorique.

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

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

$$P_{c1} = 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot G_{c1} \cdot B_{c1}^2 \quad [W] \quad (III.50)$$

$$G_{c1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot h_{c1} \cdot \pi \cdot (D_{ext} - h_{c1}) \quad [Kg] \quad (III.51)$$

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

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

$$P_{fer} = P_{c1} + P_{fz1} \quad [W] \quad (III.52)$$

### III.2.3. Pertes électriques dans le cuivre et dans l'aluminium :

Elles constituent les pertes par effet joule dissipées dans l'enroulement statorique et la cage rotorique, qui sont proportionnelles au carré des courants qui circulent dans ces enroulements.

#### a) Pertes joules statorique :

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

$$P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_{n1}^2 \quad [\text{W}] \quad (\text{III.52})$$

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

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

#### b) Pertes joules rotorique :

Ce sont les pertes dans l'aluminium, elles sont données par la formule suivante :

$$P_{j2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad [\text{W}] \quad (\text{III.53})$$

Avec :  $m_2$  Nombre de phase rotorique. ( $m_2 = Z_2$ ) ;  $I_2$  Courant dans la barre.

$R_2$  Résistance d'une phase rotorique.

#### III.2.4. Pertes mécanique :

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

$$P_{mec} = K_t \cdot (N_s \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_{ext} \cdot 10^{-2})^4 \quad [\text{W}] \quad (\text{III.54})$$

Avec :  $K_t$  Facteur de majoration.

- $K_t = 1,3 \cdot (1 - D_{ext} \cdot 10^{-3})$  pour  $2p=2$ .
- $K_t = 1$  pour  $2p > 2$ .

#### III.2.5. Pertes supplémentaires :

Ces pertes ont pour origine le champ de fuite dans les encoches et dans les têtes des bobines, on les estime à 0,5 % de la puissance absorbée par le moteur. Elles sont données par la formule suivante :

$$P_{sup} = 0,005 \cdot \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n} \quad [\text{W}] \quad (\text{III.55})$$



### III.2.6. Pertes totales :

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{tot} = P_{fer} + P_{j1} + P_{j2} + P_{mec} + P_{sup} \quad [W] \quad (III.56)$$

### III.2.7. Rendement de la machine :

Le rendement est donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_n \cdot 10^3}{P_n \cdot 10^3 + P_{tot}} \quad (III.57)$$

### III.2.8. Calcul de la résistance de magnétisation :

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

$$I_{oa} = \frac{P_{fer} + P_{mec} + P_{a10}}{m_1 \cdot U_{n1}} = \frac{P_{fer} + P_{mec} + R_1 \cdot m_1 \cdot (I_\mu)^2}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad [A] \quad (III.57)$$

$$D'où: \quad R_m = \frac{X_m \cdot I_\mu}{I_{oa}} \quad [\Omega] \quad (III.58)$$

Avec :  $I_\mu$  Courant magnétisant. [A] ;  $X_m$  Réactance magnétisante exprimée en : [Ω].

### III.2.9. Caractéristique de fonctionnement de moteur :

#### III.2.9.1. Introduction :

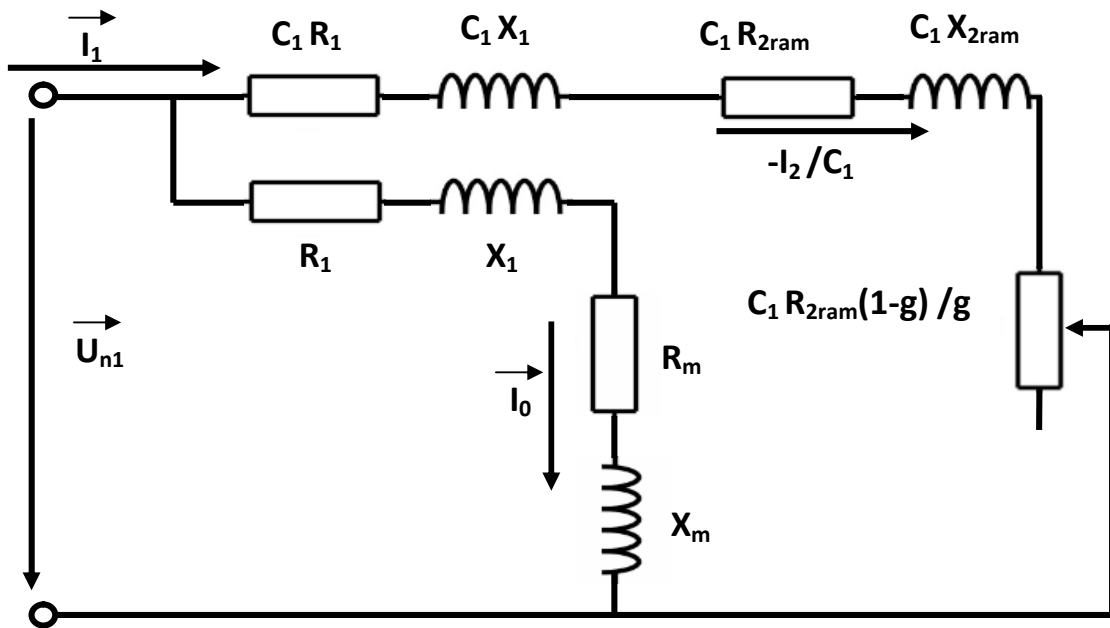
Dans ce chapitre, nous étudions les performances des moteurs, en utilisant une méthode analytique se basant sur les schémas équivalents de la machine asynchrone. Il existe deux types de schémas équivalents :

- Schéma équivalent d'une machine asynchrone considéré comme un transformateur (schéma équivalent en T).  
- Schéma équivalent d'une machine asynchrone avec circuit magnétisant rapporté aux bornes du réseau (schéma équivalent en L).

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

### III.2.9.2. Schéma équivalent en L du moteur :

C'est un schéma conventionnel monophasé ramené au stator :



**Fig. B : schéma équivalent en L du moteur**

Avec :  $R_1$  Résistance statorique en  $[\Omega]$  ;  $X_1$  Réactance de fuite du stator en  $[\Omega]$

$R_m$  Résistance magnétisante en  $[\Omega]$  ;  $X_m$  Réactance magnétique en  $[\Omega]$

$X_{2ram}$  Réactance de fuite du rotor ramené au stator en  $[\Omega]$  ;

$R_{2ram}$  Résistance rotorique ramené au stator en  $[\Omega]$  ;

$C_1$  constante de transformation du schéma en T vers le schéma en L.

Elle est donné par :  $C_1 \approx 1 + \frac{X_1}{X_m}$  **(III.59)**

### III.2.9.3. Caractéristique de fonctionnement du moteur :

En se référant à la figure B, on détermine les différentes caractéristiques du moteur :

**a) Glissement :** 
$$g = \frac{A - \sqrt{A^2 - C_1^2 \cdot R_{2ram} \cdot B}}{B} \quad (\text{III.60})$$

- De quelque kW à 100 kW :  $0 < g < 3\%$

- Au delà de 100 kW :  $0 < g < 1\%$

Avec :  $B = 2A + R'$  (III.61)

$$A = \frac{m_1 U_{n1}^2}{2p'_2} - R_1 \quad (\text{III.62})$$

$$R' = R_{2ram} \left[ \left( \frac{R_1}{R_{2ram}} \left( 1 + \frac{X_{2ram}}{X_m} \right) \right)^2 + \left( \frac{X_1}{R_{2ram}} \left( 1 + \frac{X_{2ram}}{X_m} \right) + \frac{X_{2ram}}{R_{2ram}} \right)^2 \right] \quad [\Omega] \quad (\text{III.63})$$

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

Elle est donnée par la relation suivante :

$$P'_2 = P_2 + P_{\text{sup}} + P_{\text{mec}} \quad [\text{W}] \quad (\text{III.64})$$

#### c) Impédance équivalente :

Elle est exprimé par :

$$Z_{2eq} = \sqrt{R_{2eq}^2 + X_{2eq}^2} \quad [\Omega] \quad (\text{III.65})$$

Avec :  $R_{2eq} = C_1 R_1 + C_1^2 R_{2ram} / g \quad [\Omega] \quad (\text{III.66})$

$$X_{2eq} = C_1 X_1 + C_1^2 X_{2ram} \quad [\Omega] \quad (\text{III.67})$$

#### d) Calcul du courant secondaire :

Le courant dans le circuit secondaire est donné par :

$$I''_2 = \frac{U_{n1}}{Z_{2eq}} \quad [\text{A}] \quad (\text{III.68})$$

$$I'_2 = C_1 I''_2 \quad [\text{A}] \quad (\text{III.69})$$

Avec :  $I''_2$  Le courant dans le circuit secondaire transformé en L.

$I'_2$  Le courant dans le circuit secondaire ramené au primaire.

### e) Facteur de Puissance rotorique :

Le facteur de puissance rotorique est donnée par :

$$\cos\phi_2 = \frac{R_{2eq}}{Z_{2eq}} \quad (\text{III.70})$$

D'où : **-Courant actif :**  $I''_{2a} = I''_2 \cdot \cos\phi_2$  [A] **(III.70)**

**-Courant réactif :**  $I''_{2r} = I''_2 \cdot \sin\phi_2$  [A] **(III.71)**

**-Courant actif qui correspond aux pertes fer et aux pertes joules statorique**

**A vide :**  $I_{0a} = \frac{P_{a10} + P_{mec} + P_{f1}}{m_1 \cdot U_{n1}}$  [A] **(III.72)**

**-Courant magnétisant :**

$$I_{0r} = \frac{P \cdot \sum Fi}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad [A] \quad (\text{III.73})$$

**-Courant total à vide :**

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \quad [A] \quad (\text{III.74})$$

**-Courant absorbé :**

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} \quad [A] \quad (\text{III.75})$$

Avec :  $I_{1a} = I_{0a} + I''_{2a}$  [A] **(III.76)**

$$I_{1r} = I_{0r} + I''_{2r} \quad [A] \quad (\text{III.77})$$

**f) Facteur de puissance de la machine est donné par :**

Il est donné par la relation suivante :

$$\cos\phi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1} \quad (\text{III.78})$$

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

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$P_1 = m_1 \cdot U_{n1} \cdot I_{1a} \quad [\text{W}] \quad (\text{III.79})$$

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

Elle est donnée par la relation :

$$N = N_s \cdot (1 - g) \quad [\text{tr/min}] \quad (\text{III.80})$$

Avec :  $N_s$  Vitesse du synchronisme ;  $g$  Glissement.

$N/N_s = 1 - g$  C'est la vitesse relative du rotor par rapport au stator.

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

Le couple utile appliquée sur l'arbre du moteur est donnée par la relation suivante :

$$C_u = 9,55 \frac{P_2 \cdot 10^3}{P_n} \quad [\text{N.m}] \quad (\text{III.81})$$

**III.2.10. Caractéristiques de démarrage et capacité de surcharge :**

Ces caractéristiques sont données de la manière suivante :

**a) Résistance équivalente au démarrage :**

Elle est exprimée comme suit :

$$R_{eqdem} = C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot R_{2dem-ram} \quad [\Omega] \quad (\text{III.82})$$

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

### b) Réactance équivalente au démarrage :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$X_{eqdem} = X_{const} + K_x \cdot X_{var} \quad [\Omega] \quad (\text{III.83})$$

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

- Pour les encoches semi ouvertes  $K_x=0,0825$

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

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

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

$$X_{const} = C_1 \cdot X_1 \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_{1dem}}{\lambda_1} + C_1^2 \cdot X_{2dem-ram} \cdot \frac{\lambda_{2d} - \lambda_{2var}}{\lambda_{2var}} \quad [\Omega] \quad (\text{III.84})$$

$$X_{var} = C_1 \cdot X_1 \cdot \frac{\lambda_{1dem}}{\lambda_1} + \frac{C_1^2 \cdot X_{2ram} \cdot \lambda_{2var}}{\lambda_2} \quad [\Omega] \quad (\text{III.85})$$

Avec :  $\lambda_{2var}$  – Composante variable de la perméance rotorique, elle est donnée par :

$$\lambda_{2var} = \lambda_{enc2var} + \lambda_{2d} \quad (\text{III.86})$$

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

Pour le type d'encoche représenté dans la figure 7.b, on a :

$$\lambda_{enc2var} = \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \quad (\text{III.87})$$

Avec :  $\lambda_1$  Perméance statorique ;  $\lambda_{1dem}$  Perméance statorique au démarrage.

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

Elle est donnée par :

$$\lambda_{enc1d} = \left( \frac{3h_{k1}}{b_{ene1} + 2b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot K_{\beta 2} \quad (\text{III.88})$$

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

### c) Capacité de surcharge :

La capacité de surcharge du moteur, c'est le rapport entre le couple maximal et le couple nominal .Elle est donné comme suit :

$$K = \frac{C_{\max}}{C_{\text{nom}}} = \frac{\frac{g_{\text{nom}}}{g_{\text{cr}}} + \frac{g_{\text{cr}}}{g_{\text{nom}}} + R_{\text{cr}}}{2 + R_{\text{cr}}} \quad (\text{III.89})$$

Avec :  $R_{\text{cr}}$  Résistance critique.

$$R_{\text{cr}} = 2.R_1 \frac{g_{\text{cr}}}{(R_{2\text{ram}}.C_1)} \quad (\text{III.90})$$

$g_{\text{nom}}$  Glissement nominal ;  $g_{\text{cr}}$  Glissement critique qui est donné par :

$$g_{\text{cr}} = \frac{C_1.R_{2\text{ram}}}{(X_1 + C_1.X_{2\text{ram}})} \quad (\text{III.91})$$

Avec :  $R_{2\text{ram}}$  Résistance rotorique ramenée.

$X_{2\text{ram}}$  Réactance rotorique ramenée.

### d) Courant de démarrage :

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

$$I_{\text{ldem}} = \frac{U_{n1}}{\sqrt{R_{\text{eqdem}}^2 + X_{\text{eqdem}}^2}} \quad [\text{A}] \quad (\text{III.92})$$

### e)Le couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique est donné en fonction du glissement  $g$  par la relation suivante :

$$C_{\text{elm}}(g) = \frac{p.m_1.U_{n1}^2 \cdot \frac{R_{2\text{demram}}}{g}}{2.\pi.f_1.[(C_1.R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_{2\text{demram}}}{g})^2 + X_{\text{eqdem}}^2]} \quad [\text{N.m}] \quad (\text{III.93})$$

Pour rappel, le couple électromagnétique  $C_{elm}$  est égal à la puissance transmise du stator au rotor divisée par la vitesse de rotation du champ  $\omega_s / P$ .

### Le couple de démarrage :

Il est donné par l'expression suivante :

$$C_{elm}(g=1) = C_d = \frac{p.m_1.U_{n_1}^2.R_{2demram}}{2.\pi.f_1.[(C_1.R_1 + C_1^2.R_{2demram})^2 + X_{eqdem}^2]} \quad [\text{N.m}] \quad (\text{III.94})$$

**N.B :** Le rapport entre le couple de démarrage et le couple nominal est estimé a :

- Pour  $h = 50 \div 132$  [mm] on a :

$$\frac{C_d}{C_{nom}} = 2 \div 2,5 \quad (\text{III.94})$$

Pour  $h = 160 \div 355$  [mm] on a :

$$\frac{C_d}{C_{nom}} = 1,2 \div 1,4 \quad (\text{III.95})$$

### g) Le couple électromagnétique max :

Le couple électromagnétique max est donné par la relation suivante :

$$\begin{aligned} \frac{dC_{elm}(g)}{dg} = 0 \quad \Rightarrow \quad g_{C_{max}} &= \frac{C_1^2.R_{2demram}}{\sqrt{(C_1.R_1)^2 + X_{eqdem}^2}} \\ C_{MAX} &= \frac{p.m_1.U_{n_1}^2.\frac{R_{2demram}}{g_{C_{max}}}}{2.\pi.f_1.[(C_1.R_1 + C_1^2.\frac{R_{2demram}}{g_{C_{max}}})^2 + X_{eqdem}^2]} \quad [\text{N.m}] \quad (\text{III.96}) \end{aligned}$$



A thin black line forming a wave shape, starting from the left edge, peaking, and then dipping towards the right edge.

# Partie III

# Calcul thermique

A thin black line forming a wave shape, starting from the left edge, dipping, and then peaking towards the right edge.

## **I.1.Introduction:**

Les pertes électriques et mécaniques se produisent lors de la transformation de ces formes d'énergie en énergie thermique, ce qui chauffe certaines parties de la machine.

L'objectif de l'étude thermique consiste à déterminer la température dans les différentes parties de la machine. Pour assurer sa fiabilité on utilise une source froide (Ventilateur afin d'assurer la fiabilité de la machine).

Suivant leurs tenus à la chaleur, les matériaux isolants utilisés dans la construction des machines électriques se divisent en classes suivantes A, E, B, F, H, C. On a opté pour la classe d'isolation F qui a une tenue à la chaleur de 155°C. Les matériaux appartenant à Cette classe sont à base de mica, d'amiante et de fibres de verre. La transmission de la chaleur dans les machines électriques a lieu par conductivité thermique, rayonnement et convection.

1-transmission de la chaleur dans les machines électriques a lieu principalement par conduction thermique, rayonnement, et convection.

2-transmission de chaleur par convection : On entend par la transmission par convection lorsqu'il s'agit des liquides et des gaz. Le phénomène de convection est créé par la circulation de l'air réfrigérant, dans ce cas on parle de la convection forcée.

3-rayonnement thermique : c'est la transmission de la chaleur par rayonnement à travers la carcasse qui transmet la chaleur au milieu ambiant.

## **I.2. Calcul de l'écart de température entre la surface intérieur de noyau statorique et celle de l'air à l'intérieur du moteur :**

Il est donné par la formule suivante :

$$\Delta\theta_{\text{surf}} = K \cdot \frac{K_0 \frac{2L_i \cdot P_{j1}}{L_{w1}} + P_{\text{fer}}}{\pi \cdot D_1 \cdot Li \cdot \alpha_1} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{I.1})$$

Avec :  $K$  Coefficient qui prend en considération le rapport des pertes dans le noyau statorique transmise à l'air à l'intérieur de la machine. Sa valeur est donnée suivant le tableau A<sub>6</sub> (Voir l'Annexe II) Pour différentes paires de pôles.

$K_0$  Coefficient déterminé par la relation entre la valeur de la conductibilité électrique spécifique du cuivre, pour une température de fonctionnement calculée et pour la valeur maximale admissible de la température. Il est donné suivant le diamètre extérieur. Pour les machines IP54 :  $K_0 = 1,07$  [W/mm<sup>2</sup> .C]

### **I.3. Calcul de la chute de température dans l'isolation de la partie d'encoche de l'enroulement statorique :**

Elle est donnée avec la formule suivante :

$$\Delta\theta_{\text{iso}} = K \frac{K_0 P_{j1} \frac{2Li}{L_{w1}}}{J_{fr} \cdot Z_1 Li} \cdot \left( \frac{e_1}{\Gamma_{eq}} + \frac{b_{enc11} + b_{enc12}}{16 \cdot \Gamma'_{eq}} \right) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{I.2})$$

$$\text{Avec :} \quad J_{fr} = 2 \cdot h_1 + b_{enc11} + \pi \cdot \frac{b_{enc12}}{2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{I.3})$$

Où :  $J_{fr}$  Périmètre de l'encoche ;  $\Gamma_{eq}$  Coefficient équivalent de conductibilité thermique d'enroulement dans l'encoche du stator, pour la classe d'isolation F on a :  $\Gamma_{eq} = 1,6 \cdot 10^{-5}$  W/mm.C°.

$\Gamma'_{eq}$  Coefficient équivalent de conductibilité thermique du conducteur .il dépend du rapport  $\frac{d_{nu}}{d_{iso}}$  qui est donné suivant la courbe de la fig2.2 (voir Annexe III).

$e_1$  Epaisseur de l'isolant de l'encoche du stator.

### **I.4. Calcul de l'augmentation de température dans la surface extérieur des parties frontales sur la température de l'air a l'intérieur du moteur :**

Il est donné par la relation suivante :

$$\Delta\theta_{fr1} = \frac{K.K_0.P_{j1} \frac{2L_{f1}}{L_{w1}}}{2\pi.D_1.L_{fr1} \alpha_1}. \quad [C^\circ] \quad (I.4)$$

$L_{f1}$  Longueur moyenne de la partie frontale d'une demi-spire. Elle est donnée par :

$$L_{f1} = (1.16 + 0.14.p) . b_{1moy} + 15 \quad [mm] \quad (I.5)$$

$L_{fr1}$  Longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique. Elle est donnée par :

$$h_{ave} \geq 160 \quad L_{fr1} = (0.12 + 0.1.p) . b_{1moy} + 10 \quad [mm] \quad (I.6)$$

$$a_{xe} \leq 132 \quad L_{fr1} = (0.19 + 0.1.p) . b_{1moy} + 10 \quad [mm] \quad (I.7)$$

### **I.5. Calcul de la chute de température dans l'isolation des parties frontales de l'enroulement statorique :**

Il est donnée par :

$$\Delta\theta_{isofr1} = \frac{K_0 P_{j1} \frac{2L_{f1}}{L_{w1}}}{2.J_{fr1}.Z_1 L_{f1}} . \left( \frac{h_1}{12.\Gamma_{eq}} \right) \quad [C^\circ] \quad (I.8)$$

### **I.6. Valeur moyenne de l'augmentation de la température de l'enroulement statorique sur la température de l'air à l'intérieur du moteur :**

Elle est donné par :

$$\Delta\theta'_1 = (\Delta\theta_{surf} + \Delta\theta_{iso}). \frac{2.L_i}{L_{w1}} + (\Delta\theta_{fr1} + \Delta\theta_{isofr1}). \frac{2.L_{f1}}{L_{w1}} \quad [C^\circ] \quad (I.9)$$

### **I.7. Surface conventionnelle de refroidissement du moteur :**

Elle est donné par :

$$S_{mot} = (\pi.D_{ext} + 8.n_p.h_p).(L_i + 2L_{fr1}) \quad [mm^2] \quad (I.10)$$

Avec :  $n_p$  Nombre d'ailettes extérieures pour refroidissement.

$h_p$  Hauteur d ailette de la carcasse.

Le produit  $n_p.h_p$  est donné suivant la figure 2.7 et  $h_p$  suivant la figure 8.8 en fonction du diamètre extérieur, (voir Annexe III).

### **I.8. Pertes transmises dans l'air à l'intérieur du moteur :**

Il est donné par :

$$\sum P_{\text{air}} = \sum P' - (1 - K)(P_{\text{elsurf}} + P_{\text{fer}}) - 0,9 P_{\text{mec}} \quad [\text{Watts}] \quad (\text{I.11})$$

$$P_{\text{elsurf}} = K_0 \cdot P_{\text{jl}} \frac{2 \cdot L_i}{L_{w1}} \quad [\text{Watts}] \quad (\text{I.12})$$

Avec :  $P_{\text{elsurf}}$  Pertes électriques dans la partie frontale.

$\sum P'$  Somme des pertes magnétiques ramenées dans l'air de l'intérieur du moteur.

### **I.9. Ecart moyen de température entre l'air à l'intérieur du moteur et la température du milieu réfrigérant :**

Il est donné par :

$$\Delta\theta_{\text{air}} = \frac{\sum P_{\text{air}}}{S_{\text{mot}} \cdot \alpha_{\text{air}}} \quad [C^\circ] \quad (\text{I.13})$$

Avec :  $\alpha_{\text{air}}$  Coefficient d'échange.

### **I.10. Ecart moyen de température de l'enroulement statorique et la température du milieu réfrigérant :**

Il est donné par :

$$\Delta\theta_1 = \Delta\theta'_1 + \Delta\theta_{\text{air}} \quad [C^\circ] \quad (\text{I.14})$$

### **I.11. La température moyenne de l'enroulement statorique :**

Elle est donnée par la relation suivante :

$$\Delta\theta_{\text{enr1}} = \Delta\theta_1 + 40 \quad [C^\circ] \quad (\text{I.15})$$

## **CHAPITRE II.**

### **Calcul de la ventilation**

#### **II.1. Introduction :**

La ventilation est un procédé de refroidissement forcé faisant circuler un courant d'air dans l'enceinte de la machine. Cet air est constamment renouvelé ce qui permet d'évacuer la chaleur à l'extérieur.

La durée de vie des machines électriques dépend de l'état de l'isolation, de ce fait, pour pouvoir assurer la bonne tenue de l'isolation de l'enroulement ainsi que pour augmenter la durée de vie de ces machines, il faut avoir une source froide qui limite cette augmentation de température. Il est important encore de signaler que les pertes augmentent avec l'accroissement de la température, ce qui diminue le rendement.

#### **II.2. Importance de problème :**

##### **II.2.1. Du point de vue mécanique :**

Etant donné que les machines électriques soit conçues avec des matériaux variés, alors sous l'effet de l'échauffement, on aura des dilatations des conducteurs et des tôles magnétiques et étant donné que les coefficients de dilatation ne soient pas les même pour tous les matériaux, ainsi que les parties de la machine ne sont pas à un instant donnée à la même température. Cela provoquera, par exemple lors du fonctionnement à vide, la dilatation du paquet de tôles beaucoup plus que les conducteurs qui sont logés dans des encoches ; alors qu'à la mise en charge le cuivre s'échauffera beaucoup plus que les tôles. Finalement, tous les phénomènes de dilatation différentielle provoquent des mouvements relatifs CUIVRE-FER et entraînent en plus des contraintes mécaniques sur les isolants et possibilité de claquage.

##### **II.2.2. Du point de vue économique :**

Economiquement, toute machine surdimensionné aura moins de pertes et s'échauffera moins et vieillira moins vite, mais elle sera plus coûteuse à l'achat .il est nécessaire de faire un compromis, par étude technico-économique tenant compte de

ces différents facteurs. Par contre une machine sous dimensionnés nécessitera une ventilation plus abondante, ce qui accroîtra d'autant les pertes mécaniques.

### II.2.3. Du point de vue électrique :

Le vieillissement des diélectriques est relatif à la température de service des machines et la durée de vie de ces dernières dépend de l'état de l'isolation, l'augmentation de la température est proportionnelles à l'accroissement des pertes, ce qui diminue le rendement.

De ce fait pour pouvoir assurer la bonne tenue de l'isolation de l'enroulement ainsi que pour augmenter la durée de vie des machines, une source froide est nécessaire pour limiter l'augmentation de la température.

## II.3. Calcul :

L'absorption de la chaleur dégagée sous l'effet des pertes totales dans la machine est assurée par une source froide qui est dans notre cas un ventilateur

### II.3.1. Dimensions du ventilateur :

- Débit d'air du ventilateur :

$$Q_b = 0,9.10^{-3} M_t \sum P_{air} \cdot \frac{\sqrt{N.10^{-3} \cdot D_{v2} \cdot 10^{-2}}}{\Delta \theta_{air}} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (\text{II.1})$$

Avec :  $M_t$  Coefficient donné suivant la hauteur d'axe.

$D_{v2}$  Diamètre extérieur du ventilateur en [mm].

$$D_{v2} = (1,6 \div 1,8) \cdot h_{axe}. \quad (\text{II.2})$$

- Vitesse linéaire périphérique des ailettes :

$$V_e = \pi \cdot D_{v2} \frac{N}{60.10^3} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{II.3})$$

- **Surface transversale du canal entre les palettes à la sortie d'air :**

$$S_p = 2.10^6 \frac{Q_b}{0,45.V_e} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.4})$$

### II.3.2. Résistance aérodynamique de la chaîne de ventilation :

Vu la complexité de son calcul, elle est donnée par la formule empirique suivante :

$$Z = 12,3(N.10^{-3})^2.(D_{ext}.10^{-2})^2 / Q_b^2 \quad [\text{s}^2/\text{m}^6] \quad (\text{II.5})$$

- **Vitesse à l'intérieur de l'ailette :**

$$V_1 = \sqrt{V_e - 1,85.Z.Q_b^2} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{II.6})$$

- **Calcul du nombre d'ailette :**

$$N_p = \frac{6.D_{v2}}{D_{v2} - D_{v1}} \quad (\text{II.7})$$

- **Surface d'une ailette :**

$$S_{bp} = S_p \cdot \frac{D_{v2} - D_{v1}}{2\pi.D_{v2}} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.8})$$



## Résultats :

En variant le rapport du diamètre intérieur sur le diamètre extérieur  $K_d$  (valeurs recommandées par l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIE d'AZAZGA), on a abouti aux résultats suivants :

### Pour Dext1=135 mm :

|  |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Le rapport de diamètre intérieur sur le diamètre extérieur : $K_d = D1/D_{ext1}$ . | 0,60                  | 0,61                  | 0,62                  | 0,63                  | 0,64                  | 0,65                  |
| Le diamètre intérieur $D1$ [mm]  | 81                    | 82,35                 | 83,7                  | 85,05                 | 86,4                  | 87,75                 |
| La longueur virtuelle du stator. $L_i$ [mm]  | 231,795               | 224,258               | 217,082               | 210,245               | 203,726               | 197,506               |
| Le glissement .g   | 0,031                 | 0,03                  | 0,029                 | 0,028                 | 0,028                 | 0,027                 |
| Le couple utile. $C_u$ [N.m]   | 19,719                | 19,7                  | 19,677                | 19,657                | 19,644                | 19,627                |
| Le facteur de puissance de la machine :cos ( $\phi_{21}$ )                         | 0,82                  | 0,823                 | 0,823                 | 0,823                 | 0,825                 | 0,825                 |
| Le courant nominal du stator. $I_{n1}$ [A]   | 3,82                  | 3,82                  | 3,82                  | 3,82                  | 3,82                  | 3,82                  |
| Le rendement de la machine. $\eta$   | 0,808                 | 0,81                  | 0,813                 | 0,815                 | 0,817                 | 0,819                 |
| Les pertes totales dans la machine. $P_{totale}$ (W)                               | 712,809               | 704,508               | 691,643               | 679,619               | 673,371               | 662,737               |
| La vitesse de rotation du moteur $N$ [tr/min]                                      | 1453                  | 1454                  | 1456                  | 1457                  | 1458                  | 1460                  |
| Le courant au démarrage. $I_{ld}$ [A]  | 22,237                | 22,686                | 23,262                | 23,804                | 24,124                | 24,599                |
| Le couple de démarrage. $C_d$ [N.m]  | 63,187                | 62,155                | 61,968                | 61,721                | 60,529                | 60,189                |
| Le couple maximale de la machine. $C_{max}$ [N.m]                                  | 65,185                | 64,881                | 65,345                | 65,773                | 65,396                | 65,76                 |
| Le rapport du couple de démarrage sur le couple utile. [ $C_d/C_u$ ]               | 3,204                 | 3,155                 | 3,149                 | 3,14                  | 3,081                 | 3,067                 |
| Le rapport du courant du démarrage sur le courant absorbé. $I_{ld}/I_1$            | 5,771                 | 5,926                 | 6,096                 | 6,256                 | 6,376                 | 6,517                 |
| La capacité de surcharge de la machine. $C_s$                                      | 2,622                 | 2,568                 | 2,563                 | 2,557                 | 2,503                 | 2,495                 |
| La charge linéaire. $A_1$ [A/m]  | $2,3 \cdot 10^4$      | $2,3 \cdot 10^4$      | $2,3 \cdot 10^4$      | $2,3 \cdot 10^4$      | $2,3 \cdot 10^4$      | $2,3 \cdot 10^4$      |
| L'induction magnétique dans l'entrefer. $B_\delta$ [T]                             | 0,621                 | 0,627                 | 0,641                 | 0,654                 | 0,66                  | 0,673                 |
| Le coefficient de remplissage. $K_{rel}$   | 0,614                 | 0,658                 | 0,70                  | 0,764                 | 0,827                 | 0,9                   |
| La densité de courant. $J_1$ [A/m]   | 8,2                   | 8,2                   | 8,2                   | 8,2                   | 8,2                   | 8,2                   |
| Le coefficient de saturation de la machine. $K_\mu$                                | 1,38                  | 1,37                  | 1,36                  | 1,36                  | 1,35                  | 1,34                  |
| La réactance de magnétisation. $X_m$ . [ohm]                                       | 204,107               | 209,02                | 209,869               | 210,697               | 215,496               | 216,264               |
| La résistance active d'une phase du stator. $R_1$ [ohm]                            | 9,508                 | 9,546                 | 9,479                 | 9,417                 | 9,464                 | 9,41                  |
| La réactance totale du stator. $X_1$ [ohm]   | 6,307                 | 6,467                 | 6,48                  | 6,496                 | 6,66                  | 6,679                 |
| La résistance active d'une phase du rotor. $R_2$ [ohm]                             | $1,331 \cdot 10^{-4}$ | $1,231 \cdot 10^{-4}$ | $1,163 \cdot 10^{-4}$ | $1,101 \cdot 10^{-4}$ | $1,025 \cdot 10^{-4}$ | $9,748 \cdot 10^{-5}$ |
| La résistance rotorique de démarrage ramené au stator. $R_{2demram}$ [ohm]         | 6,691                 | 6,323                 | 5,996                 | 5,703                 | 5,446                 | 5,208                 |
| La réactance de dispersion. $X_2$ [ohm]  | $3,697 \cdot 10^{-4}$ | $3,66 \cdot 10^{-4}$  | $3,624 \cdot 10^{-4}$ | $3,589 \cdot 10^{-4}$ | $3,554 \cdot 10^{-4}$ | $3,521 \cdot 10^{-4}$ |
| Le courant magnétisant. $I_\mu$ [A]  | 1,815                 | 1,773                 | 1,765                 | 1,758                 | 1,719                 | 1,713                 |
| La masse du cuivre $M_{cu}$ . [Kg]   | 4,906                 | 4,892                 | 4,881                 | 4,872                 | 4,865                 | 4,859                 |
| La masse de l'aluminium. $M_{al2}$ [Kg]  | 1,058                 | 1,081                 | 1,082                 | 1,083                 | 1,102                 | 1,101                 |
| La masse du noyau statorique et rotorique. $M_{12}$ [Kg]                           | 9,456                 | 8,947                 | 8,509                 | 8,092                 | 7,65                  | 7,273                 |
| La somme des masses (cuivre, aluminium, noyau statorique et rotorique) [Kg]        | 15,419                | 14,92                 | 14,472                | 14,047                | 13,617                | 13,233                |

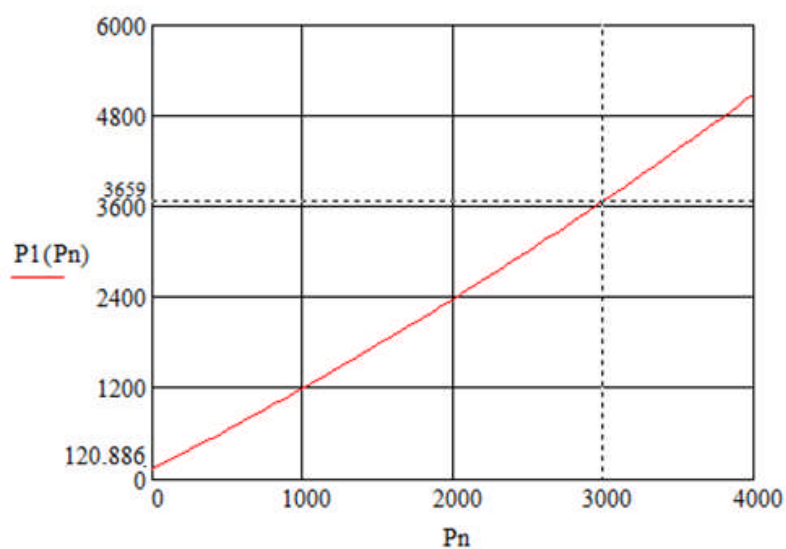
### Pour Dext1=145 mm :

|  |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Le rapport de diamètre intérieur sur le diamètre extérieur : $K_d = D1/D_{ext1}$ . | 0,60                  | 0,61                  | 0,62                  | 0,63                  | 0,64                  | 0,65                  |
| Le diamètre intérieur D1 [mm]  | 87                    | 88,45                 | 89,9                  | 91,35                 | 92,8                  | 94,25                 |
| La longueur virtuelle du stator. Li [mm]   | 200,926               | 194,392               | 188,172               | 182,246               | 176,595               | 171,203               |
| Le glissement .g   | 0,027                 | 0,027                 | 0,026                 | 0,025                 | 0,025                 | 0,024                 |
| Le couple utile. Cu [N.m]  | 19,638                | 19,625                | 19,609                | 19,598                | 19,589                | 19,577                |
| Le facteur de puissance de la machine. $\cos(\varphi_{21})$                        | 0,817                 | 0,819                 | 0,819                 | 0,821                 | 0,823                 | 0,822                 |
| Le courant nominal du stator. Inom [A]   | 3,82                  | 3,82                  | 3,82                  | 3,82                  | 3,82                  | 3,82                  |
| Le rendement de la machine. $\eta$   | 0,812                 | 0,813                 | 0,815                 | 0,817                 | 0,818                 | 0,82                  |
| Les pertes totales dans la machine. $P_{totale}(W)$                                | 696,821               | 690,049               | 679,031               | 673,475               | 668,425               | 659,291               |
| La vitesse de rotation du moteur N [tr/min]  | 1459                  | 1460                  | 1461                  | 1462                  | 1463                  | 1463                  |
| Le courant au démarrage. I1d [A]   | 24,115                | 24,415                | 24,874                | 25,099                | 25,29                 | 25,655                |
| Le couple de démarrage. Cd [N.m]   | 59,242                | 58,031                | 57,644                | 56,403                | 55,172                | 54,732                |
| Le couple maximale de la machine. Cmax [N.m]                                       | 64,515                | 64,172                | 64,537                | 64,147                | 63,745                | 64,014                |
| Le rapport du couple de démarrage Cd sur le couple utile [Cu]                      | 3,017                 | 2,957                 | 2,94                  | 2,878                 | 2,817                 | 2,795                 |
| Le rapport du courant de démarrage sur le courant absorbé. I1d/I1                  | 6,248                 | 6,36                  | 6,494                 | 6,585                 | 6,664                 | 6,772                 |
| La capacité de surcharge de la machine. Cs   | 2,506                 | 2,456                 | 2,45                  | 2,604                 | 2,352                 | 2,345                 |
| La charge linéaire. A1 [A/m]   | $2,3 \cdot 10^4$      | $2,3 \cdot 10^4$      | $2,3 \cdot 10^4$      | $2,3 \cdot 10^4$      | $2,3 \cdot 10^4$      | $2,3 \cdot 10^4$      |
| L'induction magnétique dans l'entrefer. B <sub>δ</sub> [T]                         | 0,669                 | 0,677                 | 0,692                 | 0,699                 | 0,707                 | 0,722                 |
| Le coefficient de remplissage. Kre1  | 0,51                  | 0,554                 | 0,593                 | 0,637                 | 0,686                 | 0,746                 |
| La densité de courant. J1 [A/m]  | 8,2                   | 8,2                   | 8,2                   | 8,2                   | 8,2                   | 8,2                   |
| Le coefficient de saturation de la machine. K <sub>μ</sub>                         | 1,41                  | 1,40                  | 1,39                  | 1,38                  | 1,38                  | 1,37                  |
| La réactance de magnétisation. Xm. [ohm]   | 204,659               | 208,974               | 209,519               | 213,763               | 217,972               | 218,428               |
| La résistance active d'une phase du stator. R1 [ohm]                               | 9,55                  | 9,59                  | 9,542                 | 9,591                 | 9,642                 | 9,598                 |
| La réactance totale du stator. X1[ohm]   | 6,624                 | 6,783                 | 6,799                 | 6,961                 | 7,125                 | 7,146                 |
| La résistance active d'une phase du rotor. R2 [ohm]                                | $1,01 \cdot 10^{-4}$  | $9,422 \cdot 10^{-5}$ | $8,966 \cdot 10^{-5}$ | $8,402 \cdot 10^{-5}$ | $7,893 \cdot 10^{-5}$ | $7,559 \cdot 10^{-5}$ |
| La résistance rotorique de démarrage ramené au stator. R2demram. [ohm]             | 5,334                 | 5,098                 | 4,878                 | 4,688                 | 4,517                 | 4,354                 |
| La réactance de dispersion. X2 [ohm]   | $3,502 \cdot 10^{-4}$ | $3,466 \cdot 10^{-4}$ | $3,432 \cdot 10^{-4}$ | $3,397 \cdot 10^{-4}$ | $3,363 \cdot 10^{-4}$ | $3,332 \cdot 10^{-4}$ |
| Le courant magnétisant. I <sub>μ</sub> [A]   | 1,81                  | 1,773                 | 1,768                 | 1,733                 | 1,7                   | 1,696                 |
| La masse du cuivre M <sub>cu</sub> . [Kg]  | 4,946                 | 4,942                 | 4,941                 | 4,941                 | 4,943                 | 4,947                 |
| La masse de l'aluminium. M <sub>al2</sub> [Kg]                                     | 1,093                 | 1,109                 | 1,105                 | 1,118                 | 1,13                  | 1,123                 |
| La masse du noyau statorique et rotorique. M12 [Kg]                                | 9,014                 | 8,545                 | 8,143                 | 7,717                 | 7,311                 | 6,966                 |
| La somme des masses (cuivre, aluminium, noyau statorique et rotorique) [Kg]        | 15,053                | 14,597                | 14,188                | 13,776                | 13,384                | 13,036                |

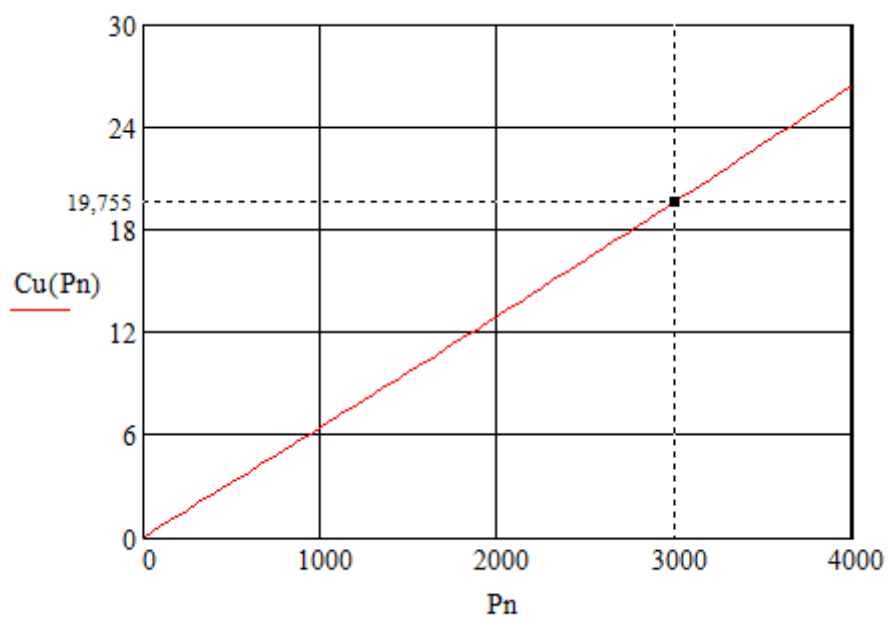
### Pour Dext1=170 mm :

|  |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Le rapport de diamètre intérieur sur le diamètre extérieur : $K_d = D1/D_{ext1}$ . | 0,60                  | 0,61                  | 0,62                  | 0,63                  | 0,64                  | 0,65                  |
| Le diamètre intérieur $D1$ [mm]  | 102                   | 103,7                 | 105,4                 | 107,1                 | 108,8                 | 110,5                 |
| La longueur virtuelle du stator. $L_i$ [mm]  | 146,175               | 141,422               | 136,897               | 132,585               | 128,474               | 124,552               |
| Le glissement .g   | 0,023                 | 0,023                 | 0,023                 | 0,022                 | 0,022                 | 0,022                 |
| Le couple utile. $C_u$ [N.m]   | 19,549                | 19,544                | 19,54                 | 19,537                | 19,534                | 19,533                |
| Le facteur de puissance de la machine :cos ( $\phi_{21}$ )                         | 0,81                  | 0,811                 | 0,812                 | 0,813                 | 0,812                 | 0,821                 |
| Le courant nominal du stator. $I_{1n}$ [A]   | 3,82                  | 3,82                  | 3,82                  | 3,82                  | 3,82                  | 3,82                  |
| Le rendement de la machine. $\eta$   | 0,81                  | 0,811                 | 0,812                 | 0,813                 | 0,814                 | 0,814                 |
| Les pertes totales dans la machine. $P_{totale}$ (W)                               | 702,521               | 698,593               | 695,179               | 692,253               | 685,806               | 683,868               |
| La vitesse de rotation du moteur .N [tr/min]                                       | 1466                  | 1466                  | 1466                  | 1466                  | 1467                  | 1467                  |
| Le courant au démarrage. $I_{1d}$ [A]  | 25,557                | 25,599                | 25,615                | 25,606                | 25,765                | 25,709                |
| Le couple de démarrage. $C_d$ [N.m]  | 46,388                | 45,281                | 44,205                | 43,161                | 42,754                | 41,762                |
| Le couple maximale de la machine. $C_{max}$ [N.m]                                  | 59,527                | 59,092                | 58,641                | 58,176                | 58,246                | 57,74                 |
| Le rapport du couple de démarrage et de couple utile. [ $C_d/C_u$ ]                | 2,373                 | 2,317                 | 2,262                 | 2,209                 | 2,189                 | 2,138                 |
| Le rapport du courant du démarrage et du courant absorbé. $I_{1d}/I_1$             | 6,53                  | 6,56                  | 6,581                 | 6,593                 | 6,637                 | 6,634                 |
| La capacité de surcharge de la machine. $C_s$                                      | 2,157                 | 2,118                 | 2,079                 | 2,04                  | 2,032                 | 1,994                 |
| La charge linéaire. $A_1$ [A/m]  | $2,3 \cdot 10^4$      | $2,3 \cdot 10^4$      | $2,3 \cdot 10^4$      | $2,3 \cdot 10^4$      | $2,3 \cdot 10^4$      | $2,3 \cdot 10^4$      |
| L'induction magnétique dans l'entrefer. $B_\delta$ [T]                             | 0,782                 | 0,794                 | 0,805                 | 0,817                 | 0,835                 | 0,847                 |
| Le coefficient de remplissage. $K_{rel}$   | 0,37                  | 0,39                  | 0,419                 | 0,446                 | 0,47                  | 0,51                  |
| La densité de courant. $J_1$ [A/m]   | 8,2                   | 8,2                   | 8,2                   | 8,2                   | 8,2                   | 8,2                   |
| Le coefficient de saturation de la machine. $K_\mu$                                | 1,47                  | 1,46                  | 1,45                  | 1,45                  | 1,43                  | 1,43                  |
| La réactance de magnétisation. $X_m$ . [ohm]                                       | 208,358               | 211,501               | 214,61                | 217,686               | 217,574               | 220,59                |
| La résistance active d'une phase du stator. $R_1$ [ohm]                            | 10,155                | 10,215                | 10,278                | 10,344                | 10,323                | 10,396                |
| La réactance totale du stator. $X_1$ [ohm]   | 7,801                 | 7,967                 | 8,135                 | 8,306                 | 8,333                 | 8,508                 |
| La résistance active d'une phase du rotor. $R_2$ [ohm]                             | $5,925 \cdot 10^{-5}$ | $5,633 \cdot 10^{-5}$ | $5,368 \cdot 10^{-5}$ | $5,127 \cdot 10^{-5}$ | $4,994 \cdot 10^{-5}$ | $4,792 \cdot 10^{-5}$ |
| La résistance rotorique de démarrage ramené au stator. $R_{2demram}$ .             | 3,719                 | 3,618                 | 3,528                 | 3,447                 | 3,372                 | 3,308                 |
| La réactance de dispersion. $X_2$ [ohm]  | $3,097 \cdot 10^{-4}$ | $3,064 \cdot 10^{-4}$ | $3,033 \cdot 10^{-4}$ | $3,002 \cdot 10^{-4}$ | $2,975 \cdot 10^{-4}$ | $2,946 \cdot 10^{-4}$ |
| Le courant magnétisant. $I_\mu$ [A]  | 1,778                 | 1,752                 | 1,276                 | 1,702                 | 1,703                 | 1,68                  |
| La masse du cuivre $M_{cu}$ . [Kg]   | 5,241                 | 5,26                  | 5,284                 | 5,308                 | 5,334                 | 5,362                 |
| La masse de l'aluminium. $M_{al2}$ [Kg]  | 1,118                 | 1,118                 | 1,117                 | 1,115                 | 1,094                 | 1,09                  |
| La masse du noyau statiques et rotorique. $M_{12}$ [Kg]                            | 8,267                 | 7,88                  | 5,513                 | 7,163                 | 6,869                 | 6,552                 |
| La somme des masses (cuivre, aluminium, noyau statorique et rotorique) [Kg]        | 14,626                | 14,26                 | 13,913                | 13,586                | 13,297                | 13,003                |

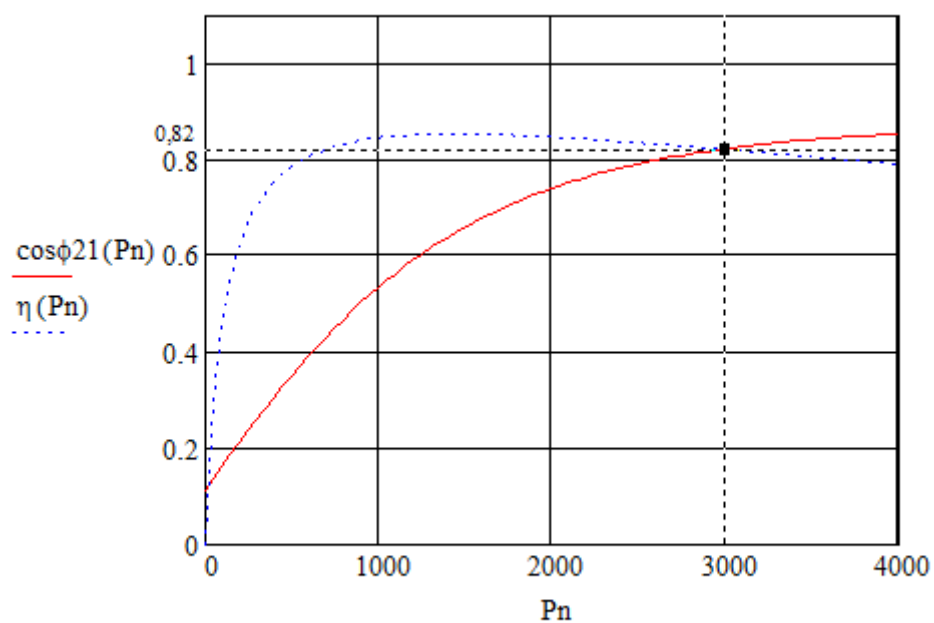
**Courbe1 : la puissance absorbée en fonction de la puissance nominale :**



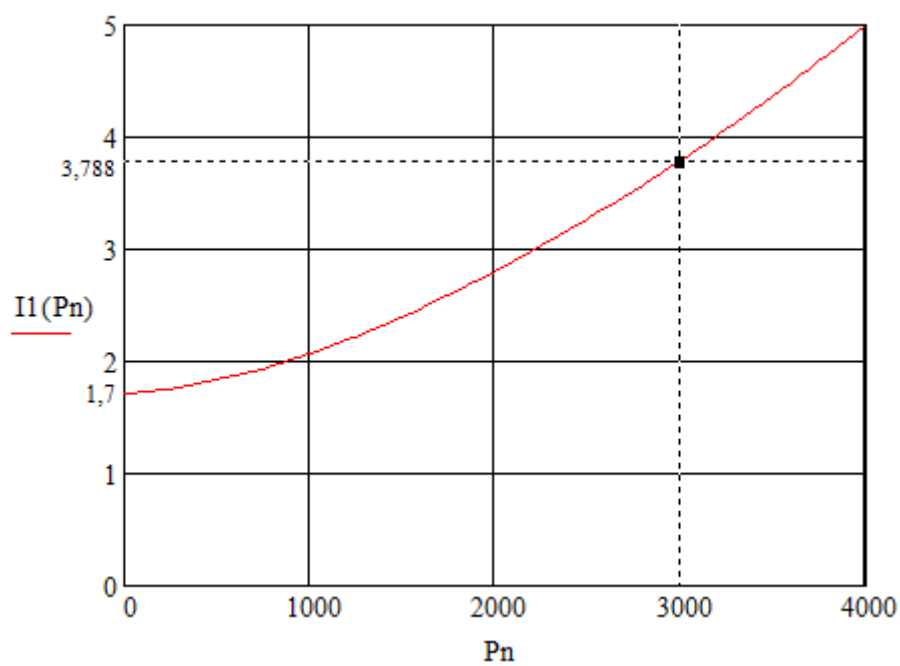
**Courbe 2: le couple utile en fonction de la puissance nominale :**



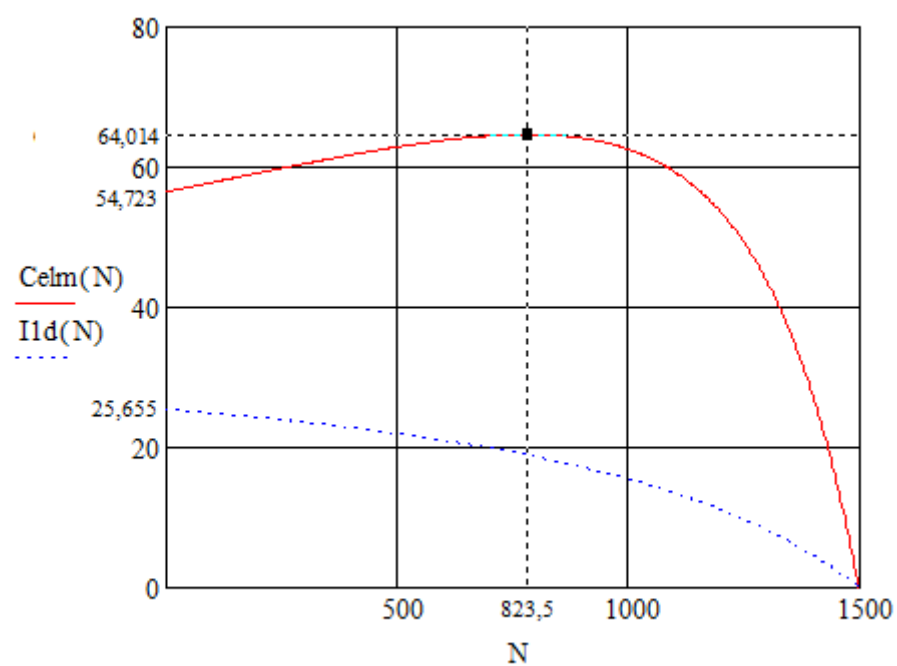
**Courbe 3: le facteur de puissance et le rendement en fonction de la puissance nominale :**



**Courbe 4: Le courant absorbé en fonction de la puissance nominale:**



**Courbe 5: Le couple électromagnétique en fonction de la vitesse N:**



### Interprétation des résultats obtenus :

Pour les différents diamètres extérieurs de la machine, en augmentant le rapport du diamètre intérieur sur le diamètre extérieur ( $K_d$ ). On constate :

L'augmentation des différents paramètres suivants :

- Le rendement de la machine  $\eta$ .
- La vitesse de rotation du moteur  $N$ .
- Le facteur de puissance de la machine  $\cos(\phi)$ .
- La résistance active d'une phase du stator  $R_1$ .
- La réactance de magnétisation  $X_m$  et la réactance totale du stator  $X_1$ .

Et la diminution de :

- La longueur virtuelle du stator  $L_i$ .
- Les pertes totales dans la machine  $T_{\text{totale}}(W)$ .
- Le couple utile de la machine  $C_u$ .
- Le courant de démarrage  $I_{ld}$ .
- La résistance active d'une phase du rotor  $R_2$ .
- La résistance rotorique de démarrage ramené au stator  $R_{2\text{demram}}$ .

**NB :** Les courbes relevées ci-dessus sont pour le meilleur rendement de cette série.

Il est obtenu pour un diamètre extérieur égal à 145 mm et un  $K_d$  égale à 0,65.

Et pour les différents graphes relevés, on remarque que:

- **La courbe 1 :** représente la puissance absorbée par le moteur en fonction de la puissance nominale, elle augmente d'une manière linéaire avec la puissance nominale, donc on peut dire que la puissance absorbée est presque égale à la puissance nominale, la petite différence est due aux pertes.
- **La courbe 2 :** Représente le couple utile en fonction de la puissance nominale, il augmente d'une manière linéaire avec la puissance nominale, donc on dira qu'il est proportionnel à la puissance nominale.
- **La courbe 3 :** représente le rendement et le facteur de puissance en fonction de la puissance nominale.
  - La courbe en bleu représente le rendement en fonction de la puissance nominale qui commence par l'origine, elle augmente d'une manière

linéaire jusqu'à  $P_n = 400\text{watts}$ . En dépassant les 400Watts la courbe commence à se saturer, donc quelque soit la variation de la puissance nominale, le rendement reste presque constant.

- La courbe en rouge représente le facteur de puissance en fonction de la puissance nominale, elle évolue d'une manière exponentielle et elle ne commence pas par l'origine.

- **La courbe 4** : représente le courant absorbé en fonction de la puissance nominale, il est proportionnel à cette dernière, une fois qu'on augmente la puissance le courant augmente.

- **La courbe 5** : représente la caractéristique mécanique et le courant de démarrage du moteur en fonction de la puissance nominale.

La caractéristique mécanique peut être divisée en deux parties. La première est la zone de démarrage du moteur où le couple de démarrage est très fort et qui est proportionnelle au courant de démarrage (très fort) avec une résistance rotorique très faible, le moteur peut démarrer en charge. La deuxième partie est la zone de fonctionnement du moteur, elle est presque linéaire, cette partie de la courbe est très verticale. La vitesse varie peu avec la charge.

On remarque que le courant de démarrage est important, il est très supérieur au courant de marche normale, il peut en résulter un échauffement excessif du stator et éventuellement du transformateur d'alimentation. Son intensité diminue avec l'augmentation de la vitesse de rotation rotorique  $N$ .



Conclusion

Générale

## Conclusion générale

Optimiser une série de machines électriques nécessite une étude profonde et des recherches intenses, ainsi que des moyens. Ce qui induit à une longue durée de travail.

En tenant compte des résultats obtenus dans notre travail avec les différentes valeurs du rapport du diamètre intérieur sur le diamètre extérieur qui sont recommandées par l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIE d'AZAZGA, nous sommes parvenus à des résultats satisfaisants du fait que toutes les contraintes électriques, magnétiques et thermiques sont dans les limites admissibles. La méthode de calcul ainsi que le programme informatique utilisés nous ont été d'un apport important en matière de temps pour le calcul optimal du rendement et pour les autres résultats de cette série de machine.

Enfin on dira que le domaine de la construction optimale d'une machine électrique s'avère très vaste et que l'amélioration du rendement des machines est un sujet d'actualité. Nous souhaitons apporter un appui important pour les étudiants des promotions futures afin d'optimiser les machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil et que d'autres études soient faites en prenant en considération d'autres paramètres sur ce sujet.

## DIMENSIONNEMENT DU STATOR

ANNEKE

### La puissance électromagnétique: $p_e$

$k_e$ : Facteur de majoration

$$k_e := 0.975$$

$P_n$ : Puissance nominale

$$P_n := 3 \quad (\text{kw})$$

$\cos(\phi_n)$ : Facteur de puissance

$$\cos(\phi_n) := 0.83$$

$\eta_n$ : Le rendement nominal

$$\eta_n := 0.83$$

$$\arccos(0.83) = 0.592 \quad \phi_n := 0.54$$

$$p_e := \frac{k_e \cdot P_n}{\eta_n \cdot \cos(\phi_n)} \quad p_e = 4.246 \text{ (Kw)}$$

$$m_1 := 3$$

$\alpha_i$ : Coefficient de recouvrement polaire

$$\alpha_i := 0.64$$

$k_f$ : Facteur de la forme de la courbe d'induction

$$k_f := 1.11$$

$N_s$ : vitesse de rotation de synchronisme

$$N_s := 1500 \quad \left( \frac{\text{tr}}{\text{mn}} \right)$$

$D_1$

$A_1$ : La charge linéaire

$$A_1 := 23000 \quad \left( \frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

$B_\delta$ : L'induction dans l'entrefer

$$B_\delta := 0.73 \quad (\text{T})$$

Dext1: diamètre extérieur du stator

D1: diamètre intérieur du stator

Kd: le rapport entre D1 et Dext1

Dext1 :=

$$D_{ext1} = 145$$

Kd' :=

$$Kd' = 65$$

$$Kd := \frac{Kd'}{100}$$

$$Kd = 0.65$$

$$D1 := Dext1 \cdot Kd \qquad D1 = 94.25 \text{ (mm)}$$

**Pas polaire en nombre d'encoches:**

$$p : \text{Nombre de paire de pôles} \qquad p := 2$$

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

$$\tau_p := \frac{Z1}{2 \cdot p} \qquad \tau_p = 9$$

**Pas polaire en mm:**

$$\tau_{p1} := \frac{\pi \cdot D1}{2 \cdot p} \qquad \tau_{p1} = 74.024 \text{ (mm)}$$

$$\text{Pas dentaire:} \qquad \tau_{p1} := 74$$

$$t1 := \frac{\pi \cdot D1}{Z1} \qquad t1 = 8.225 \text{ (mm)}$$

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

$$q1 := \frac{Z1}{2 \cdot p \cdot m1} \qquad q1 = 3 \text{ bobine triple}$$

**Nombre de bobines multiples:**

$$nbob := \frac{Z1}{2 \cdot q1} \qquad nbob = 6$$

Ken1 : le facteur de bobinage de l'enroulement statorique

$$kd1 := \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m1}\right)}{q1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m1 \cdot q1}\right)} \qquad kd1 = 0.96$$

**Pas d'enroulement :**

$$\varepsilon := 0 \qquad y1 = 9$$

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

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

$$\beta = 1$$

$$kr1 := \sin\left(\frac{\beta \cdot \pi}{2}\right)$$

$$kr1 = 1$$

$$Ken1 := kd1 \cdot kr1$$

$$Ken1 := 0.96$$

**Longueur virtuelle de l'induit Li:**

$$Li := \frac{8.66 \cdot 10.12 \cdot pe}{Ns \cdot D1^2 \cdot A1 \cdot B\delta \cdot Ken1}$$

$$Li = 171.203 \quad (\text{mm})$$

**Coefficient de longueur:**

$$\lambda_i := \frac{Li}{D1}$$

$$\lambda_i = 1.816$$

**Angle électrique séparant deux encoches successives:**

$$\gamma := \frac{p \cdot 360}{Z1} \quad \gamma = 20$$

**Angle entre les parois de l'encoche:**

$$\theta := \frac{360}{Z1} \quad \theta = 10^\circ$$

**la zone de phase:**

$$\alpha := q1 \cdot \gamma \quad \alpha = 60^\circ$$

**Courant nominal dans une phase:**

$$\text{Un1 la tension simple} \quad Un1 := 380 \quad (\text{V})$$

$$In1 := \frac{Pn \cdot 10^3}{3Un1 \cdot \cos(\phi_n) \cdot \eta_n} \quad In1 = 3.82 \quad (\text{A})$$

**Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche:**

$$a1: \text{le nombre de voies parallèles} \quad a1 := 2$$

$$Uen1 := \frac{a1 \cdot t1 \cdot A1 \cdot 10^{-3}}{In1}$$

$$\text{round}(Uen1, 0) = 99$$

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

$$W1 := \frac{p \cdot q1 \cdot \text{round}(Uen1, 0)}{a1} \quad W1 = 297$$

**Nombre de spires par logement:**

$$Wlog := \frac{W1}{nbob} \quad \text{round}(Wlog, 0) = 50$$

**Nombre de spires par groupe de bobines:**

$$Wbob := \text{round}(Wlog, 0) \cdot q1 \quad Wbob = 150$$

**La fréquence:**

$$f1 := \frac{Ns \cdot p}{60} \quad f1 = 50 \text{ (Hz)}$$

**Section effective:**

$$j1 := 8.2 \quad \left( \frac{A}{mm^2} \right)$$
$$Seff1 := \frac{In1}{a1 \cdot j1} \quad Seff1 = 0.233 \quad (mm^2)$$

**Section élémentaire:**

$$Nel := 1$$
$$Snor1 := 0.3117 \quad (mm)$$
$$diso := 0.692 \quad (mm)$$
$$dnu := 0.63 \quad (mm)$$

$$Selt1 := \frac{Seff1}{Nel} \quad Selt1 = 0.233 \quad (mm^2)$$

**Choix de la tôle magnétique:**

M530 – 50A

**Perte total spécifique maximale à 50 Hz pour 1,5(T):**

$$P_s := 5.3 \left( \frac{w}{Kg} \right)$$

**Pérmeabilité maximale à 1,5 (T):**

$$\mu_a := 8.976 \cdot 10^2$$

**Largeur de la dent:**

$$\begin{aligned} B_{z1max} &:= 1.95 \quad (T) & k_{fer} &:= 0.97 \\ b_{z1} &:= \frac{t_1 \cdot B_{\delta}}{k_{fer} \cdot B_{z1max}} & b_{z1} &= 3.174 \quad (mm) \end{aligned}$$

**Hauteur du dos statorique:**

$$\begin{aligned} B_{c1} &:= 1.55 \quad (T) \\ h_{c1} &:= \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot B_{\delta}}{k_{fer} \cdot B_{c1}} & h_{c1} &= 11.497 \quad (mm) \end{aligned}$$

**Hauteur de la dent:**

$$h_{z1} := 0.5 \cdot (D_{ext1} - D_1) - h_{c1} \quad h_{z1} = 13.878 \quad (mm)$$

**Largeur minimale de l'encoche:**

$$b_{enc11} := -b_{z1} + \frac{\pi \cdot (D_1 + 0.2h_{z1})}{Z_1} \quad b_{enc11} = 5.293 \quad (mm)$$

**Largeur maximale de l'encoche:**

$$\begin{aligned} h_{f1} &:= 0.8 \div 1.2 & h_{f1} &:= 0.8 \quad (mm) \\ b_{enc12} &:= -b_{z1} + \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_{z1})}{Z_1} & b_{enc12} &= 7.473 \quad (mm) \end{aligned}$$

**Hauteur de la clavette:**

$$h_{k1} := 0.6 \quad (mm)$$

**Hauteur de l'encoche:**

$$h_{enc1} := h_{z1} - \left( h_{k1} + h_{f1} + \frac{b_{enc12}}{2} \right) \quad h_{enc1} = 8.741 \quad (mm)$$



**Section de l'encoche:**

$$\text{Sencaiso} := 0.5 \cdot (\text{benc11} + \text{benc12}) \cdot \text{henc1} + \pi \cdot \frac{\text{benc12}^2}{4 \cdot 2}$$

$$\text{Sencaiso} = 77.722 \quad (\text{mm}^2)$$

**Section occupée par les conducteurs:**

$$e1 := 0.37 \div 0.4 \quad e1 := 0.4 \quad (\text{mm})$$

$$\text{Siso} := \left( \text{benc11} + 2 \cdot \text{henc1} + \pi \cdot \frac{\text{benc12}}{2} \right) \cdot e1 \quad \text{Siso} = 13.805 \quad (\text{mm}^2)$$

$$\text{Senc1} := \text{Sencaiso} - \text{Siso} \quad \text{Senc1} = 63.916 \quad (\text{mm}^2)$$

**Coefficient de remplissage de l'encoche:**

$$\text{krel} := 0.7 \div 0.75$$

$$\text{krel} := \frac{\text{Nel} \cdot \text{Uen1} \cdot \text{diso}^2}{\text{Senc1}}$$

$$\text{krel} = 0.742$$

**Flux sous un pôle:**

$$\phi := \frac{k_e \cdot \text{Un1}}{4 \cdot k_f \cdot W1 \cdot f1 \cdot K_{en1}} \quad \phi = 5.853 \times 10^{-3} \quad (\text{Wb})$$

**Charge linéaire:**

$$A1 := \frac{\text{In1} \cdot \text{Uen1} \cdot Z1}{\pi \cdot D1 \cdot a1 \cdot 10^{-3}} \quad A1 = 2.3 \times 10^4 \quad \left( \frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

**Induction magnétique dans l'entrefer**

$$B\delta := \frac{\phi}{\alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot Li \cdot 10^{-6}} \quad B\delta = 0.722 \quad (\text{T})$$

## DIMENSIONNEMENT DU ROTOR

**Nombre d'encoche rotorique:**

$$Z2 := 28$$

**Diamètre extérieur du rotor:**

$$\delta := 0.3 \quad (\text{mm})$$

$$D2 := D1 - 2 \cdot \delta$$

$$D2 = 93.65 \quad (\text{mm})$$

**Pas dentaire:**

$$t2 := \frac{\pi \cdot D2}{Z2}$$

$$\text{round}(t2, 2) = 10.51 \quad (\text{mm})$$

**Le courant dans la barre:**

$$I2 := \frac{1.11 \cdot I_{n1} \cdot 2 \cdot m1 \cdot W1 \cdot \cos(\phi_n) \cdot K_{en1}}{Z2}$$

$$I2 = 215.022 \quad (\text{A})$$

**Hauteur de la culasse rotorique:**

$$Bc2 := 1.2 \quad (\text{T})$$

$$\tau_{p2} := \frac{\pi \cdot D2}{2 \cdot p}$$

$$\tau_{p2} = 73.553 \quad (\text{mm})$$

$$hc2 := \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau_{p2} \cdot B\delta}{k_{fer} \cdot Bc2}$$

$$\tau_{p2} := 74$$

$$hc2 = 14.686 \quad (\text{mm})$$

**Hauteur de la dent:**

$$D_{int2} := 37 \quad (\text{mm})$$

$$hz2 := 0.5[(D2 - D_{int2}) - 2hc2]$$

$$hz2 = 13.639 \quad (\text{mm})$$

**Calcul de l'encoche rotorique:**

**Largeur de l'encoche:**

$$Bz2_{\max} := 1.75 \quad (\text{T})$$

$$bz2 := \frac{t2 \cdot B\delta}{k_{fer} \cdot Bz2_{\max}}$$

$$bz2 = 4.469 \quad (\text{mm})$$

**Diamètre maximal de l'encoche:**

$$hf2 := 0.5 \text{ (mm)}$$

$$d21 := \frac{\pi \cdot (D2 - 2 \cdot hf2) - Z2 \cdot bz2}{\pi + Z2} \quad d21 = 5.329 \text{ (mm)}$$

**Diamètre minimale de l'encoche:**

$$d22 := \frac{\pi \cdot (D2 - 2 \cdot hf2) - Z2 \cdot bz2}{Z2 - \pi} \quad d22 = 3.355 \text{ (mm)}$$

**La cage rotorique:**

**Section de la barre:**

$$h2 := hz2 - hf2 - 0.5 \cdot (d21 + d22) \quad h2 = 8.797 \text{ (mm)}$$

$$henc2 := h2 + 0.5 \cdot (d21 + d22) \quad henc2 = 13.139 \text{ (mm)}$$

$$Sb := 0.25 \cdot (d21^2 + d22^2) \cdot \pi + 0.5 \cdot (d21 + d22) \cdot h2 \quad Sb = 69.336 \text{ (mm}^2\text{)}$$

**Densité du courant:**

$$jb := \frac{I2}{Sb} \quad jb = 3.101 \left( \frac{A}{mm^2} \right)$$

**Dimensionnement de l'anneau de court circuit:**

**Hauteur de l'anneau:**

$$han := (1.1 \div 1.25) \cdot hz2 \text{ (mm)}$$

$$han := 1.13 \cdot hz2 \quad han = 15.412 \text{ (mm)}$$

**Section de l'anneau:**

$$San := (0.35 \div 0.45) \cdot \frac{Z2 \cdot Sb}{2 \cdot p}$$

$$San := 0.35 \cdot \frac{Z2 \cdot Sb}{2 \cdot p} \quad San = 169.872 \text{ (mm}^2\text{)}$$

**Largeur de l'anneau:**

$$b_{an} := \frac{S_{an}}{h_{an}} \quad b_{an} = 11.022 \quad (\text{mm})$$

**Diamètre moyen intérieur de l'anneau:**

$$D_{an} := D_2 - h_{an} \quad D_{an} = 78.238 \quad (\text{mm})$$

### CALCUL DU CIRCUIT MAGNETIQUE

**Calcul du circuit magnétique statorique:**

**Induction dans la dent du stator:**

$$B_{z1} := \frac{B_{\delta} \cdot t_1}{k_{fer} \cdot b_{z1}} \quad B_{z1} = 1.928 \quad (\text{T})$$

**Automatisation du circuit magnétique(dent statorique)**

$$B_{z1} := 1.93$$

$$H_{z1} := H'(B_{z1})$$

$$H_{z1} = 2.32 \times 10^3$$

**Fmm dans la dent du stator:**

$$F_{z1} := H_{z1} \cdot h_{z1} \cdot 10^{-3} \quad F_{z1} = 32.196 \quad (\text{V})$$

**Longueur moyenne des lignes dans la culasse statorique:**

$$L_{c1} := \frac{\pi \cdot (D_{ext1} - h_{c1})}{2 \cdot p} \quad L_{c1} = 104.853 \quad (\text{mm})$$

**Fmm dans la culasse:**

$$B_{c1} := 1.55 \quad (\text{T})$$

**Automatisation du circuit magnétique(culasse statorique)**

$$H_{c1} := H''(B_{c1})$$

$$F_{c1} := H_{c1} \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3} \quad H_{c1} = 630 \left( \frac{\text{A}}{\text{m}} \right) \quad F_{c1} = 66.057 \quad (\text{A})$$

**L'entrefer:**

**Fmm dans l'entrefer:**

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

$$K\delta 1 := 1 + \frac{bf1}{t1 - bf1 + \frac{5 \cdot \delta \cdot t1}{bf1}} \quad K\delta 1 = 1.285$$

$$bf2 := 2 \cdot \text{disc} \quad (\text{mm}) \quad bf2 = 1.384$$

$$K\delta 2 := 1 + \frac{bf2}{t2 - bf2 + \frac{5 \cdot \delta \cdot t2}{bf2}} \quad K\delta 2 = 1.067$$

$$K\delta := K\delta 1 \cdot K\delta 2 \quad K\delta = 1.372$$

$$F\delta := 0.8 \cdot B\delta \cdot K\delta \cdot \delta \cdot (10^3) \quad F\delta = 237.625 \quad (\text{A})$$

**Circuit magnetique rotorique:**

**Induction dans la dent:**

$$Bz2 := \frac{B\delta \cdot t2}{k_{fer} \cdot bz2} \quad Bz2 = 1.75 \quad (\text{T})$$

**automatisation du circuit magnétique (dent rotorique)**

$$Hz2 := H'(Bz2) \quad \left( \frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$
$$Hz2 = 1.33 \times 10^3$$

**Fmm dans la dent:**

$$Fz2 := Hz2 \cdot (hz2 - 0.4 \cdot d22) \cdot 10^{-3} \quad Fz2 = 16.355 \quad (\text{A})$$

**Longueur moyenne des lignes dans la culasse rotorique:**

$$Lc2 := (D2 - 2 \cdot hz2 - hc2) \cdot \left( \frac{\pi}{2 \cdot p} \right) + hc2 \quad Lc2 = 55.281 \quad (\text{mm})$$

**Fmm dans la culasse rotorique:**

$$B_{c2} := 1.2 \text{ (T)}$$

**automatisation du Circuit magétique(culasse rotorique)**

$$H_{c2} := H''(B_{c2}) \left( \frac{A}{m} \right)$$
$$H_{c2} = 262 \left( \frac{A}{m} \right)$$

$$F_{c2} := H_{c2} \cdot L_{c2} \cdot 10^{-3} \quad F_{c2} = 14.484 \text{ (A)}$$

**Fmm totale par paire de pole:**

$$F := 2(F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2} \quad F = 652.892 \text{ (A)}$$

**Coefficient de saturation des dents:**

$$k_{\mu z} := \frac{F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} \quad k_{\mu z} = 1.204$$

**Coefficient de saturation de la machine:**

$$k_{\mu} := \frac{F}{2F_{\delta}} \quad k_{\mu} = 1.374$$

**Courant magnétisant:**

$$I_{\mu} := \frac{p \cdot F}{0.9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad I_{\mu} = 1.696 \text{ (A)}$$

**Réactance de magnétisation:**

$$X_m := \frac{k_e \cdot U_{n1}}{I_{\mu}} \quad X_m = 218.428 \text{ (Ohm)}$$

**Coefficient de dispersion magnétique du stator:**

$$T := 20^{\circ} \text{ C} \quad \rho_{cu} := 24.4 \cdot 10^{-9} \text{ (Ohm} \cdot \text{m)} \quad y_{1moy} := 9$$
$$b_{1moy} := \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{z1}) \cdot y_{1moy}}{Z_1} \quad b_{1moy} = 84.923 \text{ (mm)}$$
$$L_{f1} := (1.16 + 0.14 \cdot p) \cdot b_{1moy} + 15 \quad L_{f1} = 137.289 \text{ (mm)}$$

$$Lw1 := 2 \cdot (Li + Lf1) \quad Lw1 = 616.985 \quad (\text{mm})$$

$$R1 := \rho_{cu} \cdot \frac{W1 \cdot Lw1 \cdot 10^3}{a1 \cdot Nel \cdot Selt1} \quad Selt1 = 0.233 \quad R1 = 9.598 \quad (\text{Ohm})$$

$$T := 115^{\circ} \text{ C} \quad \rho_{cu} := 24.4 \cdot 10^{-9} \quad (\text{Ohm} \cdot \text{m})$$

$$R1 := \rho_{cu} \cdot \frac{W1 \cdot Lw1 \cdot 10^3}{a1 \cdot Nel \cdot Selt1} \quad R1 = 9.598 \quad (\text{Ohm})$$

**Réactance de fuite frontale:**

$$KB1 := 1 \quad KB2 := 1 \quad Q1 := \frac{Z2}{p} \quad Q1 = 14$$

$$Kdd1 := 0.93 \quad Krr1 := 0.014$$

$$\lambda_{1f} := 0.34 \cdot \frac{q1 \cdot (Lf1 - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau p1)}{Li} \quad \lambda_{1f} = 0.536$$

$$X_{1f} := 1.58 \cdot f1 \cdot Li \cdot W1^2 \cdot \frac{\lambda_{1f}}{p \cdot q1 \cdot 10^8} \quad X_{1f} = 1.065 \quad (\text{Ohm})$$

**Réactance de fuite différentielle:**

$$Kr1 := 1 - \left( \frac{0.033 \cdot bfl^2}{\delta \cdot t1} \right) \quad Kr1 = 0.895$$

$$\lambda_{1d} := \frac{0.9 \cdot t1 \cdot (q1 \cdot Ken1)^2 \cdot Krr1 \cdot Kdd1 \cdot Kr1}{K\delta \cdot \delta} \quad \lambda_{1d} = 1.739$$

$$X_{1d} := 1.58 \cdot f1 \cdot Li \cdot W1^2 \cdot \frac{\lambda_{1d}}{p \cdot q1 \cdot 10^8} \quad X_{1d} = 3.458 \quad (\text{Ohm})$$

**Réactance de fuite d'encoche**

$$h1 := henc1 \quad h11 := 1 \quad h1 := 10.781$$

$$\lambda_{enc1} := \frac{h1 \cdot KB1}{3 \cdot benc11} + \left( \frac{3hk1}{benc11 + 2bfl} + \frac{h11}{benc11} + \frac{hf1}{bfl} \right) KB2 \quad \lambda_{enc1} = 1.319$$

$$X_{enc1} := \frac{1.58 \cdot f1 \cdot Li \cdot W1^2 \lambda_{enc1}}{p \cdot q1 \cdot 10^8} \quad X_{enc1} = 2.622 \quad (\text{Ohm})$$

**Réactance totale X1 :**

$$\lambda1 := (\lambda_{enc1} + \lambda1f + \lambda1d) \quad \lambda1 = 3.594$$

**Coefficient de dispersion magnétique du stator:**

$$X1 := \frac{1.58 \cdot f1 \cdot Li \cdot W1^2 \cdot \lambda1}{p \cdot q1 \cdot 10^8} \quad X1 = 7.146 \quad (\text{Ohm})$$

$$\sigma\mu := \frac{X1}{Xm} \quad \sigma\mu = 0.033$$

**Force électromagnétique à vide:**

$$E0 := \frac{Un1}{1 + \sigma\mu} \quad E0 = 367.962 \quad (\text{V})$$

## PARAMETRES DU ROTOR

**Résistance active de la barre:**

$$T := 20^\circ\text{C} \quad \rho_{AL}(T) := 2.8 \cdot 10^{-8} \quad (\text{Ohm} \cdot \text{m}) \quad K_{dep} := 0.915 \quad L2 := Li$$

$$R_b := \rho_{AL}(T) \cdot \frac{L2 \cdot 10^3}{S_b} \quad R_b = 6.914 \times 10^{-5} \quad (\text{Ohm})$$

**Résistance de l'anneau:**

$$R_{an} := \frac{\rho_{AL}(T) \cdot 2 \cdot \pi \cdot D_{an} \cdot 10^3}{Z2 \cdot S_{an}} \quad R_{an} = 2.894 \times 10^{-6} \quad (\text{Ohm})$$

**Résistance de l'anneau ramenée a la barre:**

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

$$R_{anramb} := \frac{R_{an}}{K_{red}} \quad R_{anramb} = 6.448 \times 10^{-6} \quad (\text{Ohm})$$



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

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

$$\beta_{ob} = 0.783$$

$$\alpha_{ob} := \frac{2 \cdot \pi \cdot p \cdot \beta_{ob}}{Z2}$$

$$\alpha_{ob} = 0.351$$

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

$$K_{ob} = 0.995$$

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

$$M = 3.52 \times 10^4$$

$$R_{anrams} := M \cdot R_{anraml}$$

$$R_{anrams} = 0.227 \quad (\text{Ohm})$$

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

$$R2 := R_b + R_{anraml}$$

$$R2 = 7.559 \times 10^{-5} \quad (\text{Ohm})$$

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

$$R2_{ram} := M \cdot R2$$

$$R2_{ram} = 2.661 \quad (\text{Ohm})$$

**Réactances de dispersions et perméances du rotor:**

$$\lambda_{ob} := \frac{t2 \cdot \beta_{ob}^2}{9.5 \cdot \delta \cdot K_{\delta} \cdot k_{\mu}}$$

$$\lambda_{ob} = 1.199$$

$$I_{an} := \frac{I2}{K_{red}}$$

$$I_{an} = 479.105 \quad (\text{A})$$

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

$$J_{an} = 2.82 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{mm}^2}\right)$$

$$K_{dd2} := \frac{9.15}{100 \cdot \left(\frac{Z2}{6 \cdot p}\right)^2}$$

$$K_{dd2} = 0.017$$

$$\lambda_{2f} := \frac{2.3 \cdot D_{an}}{Z2 \cdot L_i \cdot K_{red}^2} \cdot \log \left[ \frac{4.7 \cdot D_{an}}{2 \cdot (h_{an} + b_{an})} \right]$$

$$\lambda_{2f} = 0.157$$

$$\psi := 1$$

$$C\lambda := \psi \cdot \left[ 0.66 + \left( 1 - \frac{\pi \cdot d_{21}^2}{8 \cdot S_b} \right)^2 \cdot \left( \frac{h_2 + 0.4 \cdot d_{22}}{3 \cdot d_{21}} \right) \right] \quad C\lambda = 1.107$$

$$\lambda_{2enc} := C\lambda + \frac{hf_2}{bf_2} \quad \lambda_{2enc} = 1.468$$

$$K_{dd2} := \frac{9.15}{100 \cdot \left( \frac{Z_2}{6 \cdot p} \right)^2} \quad K_{dd2} = 0.017$$

$$\lambda_{2d} := \frac{0.9 \cdot t_2 \cdot \left( \frac{Z_2}{6 \cdot p} \right)^2 \cdot K_{dd2}}{\delta \cdot K\delta} \quad \lambda_{2d} = 2.103$$

$$\lambda_2 := \lambda_{2enc} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob} \quad \lambda_2 = 4.927$$

$$X_2 := 7.9 \cdot f_1 \cdot L_2 \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} \quad X_2 = 3.332 \times 10^{-4} \quad (\text{Ohm})$$

**Réactance du rotor ramenée au stator:**

$$X_{2ram} := M \cdot X_2 \quad X_{2ram} = 11.728 \quad (\text{Ohm})$$

**Paramètre au démarrage:**

**Profondeur de pénétration:**

$$\begin{aligned} \phi_1 &:= 0.44 & g_d &:= 1 & h_b &:= h_{enc2} \\ h_{pp} &:= \frac{h_b}{1 + \phi_1} & & & h_{pp} &= 9.124(\text{mm}) \\ \xi_1 &:= 0.064 \cdot h_b \cdot \sqrt{g_d} & & & \xi_1 &= 0.841(\text{mm}) \end{aligned}$$

**La largeur à limite de pénétration:**

$$b_{pp} := d_{21} - \left[ \left( \frac{d_{21} - d_{22}}{h_2} \right) \cdot \left( h_{pp} - \frac{d_{21}}{2} \right) \right] \quad b_{pp} = 3.879 \quad (\text{mm})$$

**Section se la barre pénétrée par le courant de démarrage:**

$$S_{bdem} := \left( \frac{\pi \cdot d_{21}^2}{8} \right) + [0.5 \cdot (d_{21} + b_{pp}) \cdot (h_{pp} - 0.5 \cdot d_{21})] \quad S_{bdem} = 40.892 \quad (\text{mm}^2)$$

**Résistance de la barre au démarrage:**

$$K_{dep} := \frac{S_b}{S_{b_{dem}}}$$

$$K_{dep} = 1.696$$

$$R_{b_{dem}} := R_b \cdot K_{dep}$$

$$R_{b_{dem}} = 1.172 \times 10^{-4} \quad (\text{Ohm})$$

**Résistance de la cage au démarrage:**

$$R_{2_{dem}} := R_{a_{ramb}} + R_{b_{dem}}$$

$$R_{2_{dem}} = 1.237 \times 10^{-4} \quad (\text{Ohm})$$

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

$$R_{2_{demram}} := M \cdot (R_{a_{ramb}} + R_{b_{dem}})$$

$$R_{2_{demram}} = 4.354 \quad (\text{Ohm})$$

**Réactance de fuite au démarrage:**

$$\psi_1 := 1$$

$$C\lambda_1 := C\lambda \cdot \psi_1$$

$$C\lambda_1 = 1.107$$

$$\lambda_{2_{encdem}} := C\lambda_1 + \frac{hf_2}{bf_2}$$

$$\lambda_{2_{encdem}} = 1.468$$

$$\lambda_{2_{dem}} := \lambda_{2_{encdem}} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob}$$

$$\lambda_{2_{dem}} = 4.927$$

$$X_{2_{dem}} := 7.9 \cdot f_1 \cdot L_2 \cdot \lambda_{2_{dem}} \cdot 10^{-9}$$

$$X_{2_{dem}} = 3.332 \times 10^{-4} \quad (\text{Ohm})$$

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

$$X_{2_{demram}} := M \cdot X_{2_{dem}}$$

$$X_{2_{demram}} = 11.728 \quad (\text{Ohm})$$

## **CALCUL DES PERTES ET DU RENDEMENT**

**Pertes principales dans le fer:**

**Pertes dans les dents:**

$$p1 := 2.5 \quad \left( \text{W} \cdot \text{Kg}^{-1} \right)$$

$$Gz1 := 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot Li \cdot kfer \cdot [hz1 \cdot \pi \cdot (D1 + hz1) - Senc1 \cdot Z1] \quad Gz1 = 3.126 \quad (\text{Kg})$$

$$pfz1 := 1.7 \cdot p1 \cdot Gz1 \cdot Bz1^2 \quad pfz1 = 49.484 \quad (\text{W})$$

**Pertes dans la culasse statorique:**

$$Gc1 := 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot Li \cdot kfer \cdot hc1 \cdot \pi \cdot (Dext1 - hc1) \quad Gc1 = 6.246 \quad (\text{Kg})$$

$$pfc1 := 1.7 \cdot p1 \cdot Gc1 \cdot Bc1^2 \quad pfc1 = 63.778 \quad (\text{W})$$

$$Pfer := pfc1 + pfz1 \quad Pfer = 113.262 \quad (\text{W})$$

**Pertes électriques dans le cuivre et l'aluminium:**

**Pertes joules statorique:**

$$Pj1 := m1 \cdot R1 \cdot In1^2 \quad Pj1 = 420.161 \quad (\text{W})$$

**Pertes joules rotorique:**

$$m2 := 28$$

$$Pj2 := m2 \cdot R2 \cdot I2^2 \quad Pj2 = 97.85 \quad (\text{W})$$

**Perte mécanique:**

$$\text{Pour } 2p = 2 \quad Kt := 1.3 \cdot (1 - Dext1 \cdot 10^{-3})$$

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

$$Pmec := Kt \cdot (Ns \cdot 10^{-3})^2 \cdot (Dext1 \cdot 10^{-2})^4 \quad Pmec = 9.946 \quad (\text{W})$$

**Pertes supplémentaires:**

$$Psup := 0.005 \cdot \frac{Pn \cdot 10^3}{\eta n} \quad Psup = 18.072 \quad (\text{W})$$

**Pertes totales:**

$$Ptotal := Pfer + Pj1 + Pj2 + Pmec + Psup \quad Ptotal = 659.291 \quad (\text{W})$$

**Rendement de la machine:**

$$\eta := \frac{Pn \cdot 10^3}{Pn \cdot 10^3 + Ptotal} \quad \eta = 0.82$$

**Calcul de la résistance de magnétisation:**

$$U_{n1} := 380(\text{V})$$

$$P_{a10} := R_1 \cdot m_1 \cdot I_{\mu}^2 \quad P_{a10} = 82.843 \quad (\text{W})$$

$$I_{0a} := \frac{P_{fer} + P_{mec} + P_{a10}}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad I_{0a} = 0.181 \quad (\text{A})$$

$$R_m := \frac{X_m \cdot I_{\mu}}{I_{0a}} \quad R_m = 2.05 \times 10^3 \quad (\text{Ohm})$$

**CALCUL DES PERFORMANCES DU MOTEUR**

**Caractéristique de fonctionnement du moteur:**

**La puissance rapportée du circuit secondaire au circuit primaire:**

$$P_n := 3000 \quad (\text{W})$$

$$P'2 := P_n + P_{sup} + P_{mec} \quad P'2 = 3.028 \times 10^3 \quad (\text{W})$$

**Le glissement:**

$$A := \frac{3 \cdot U_{n1}^2}{2 \cdot P'2} - R_1 \quad A = 61.934 \quad (\text{Ohm})$$

$$R' := R_{2ram} \cdot \left[ \left[ \left( \frac{R_1}{R_{2ram}} \right) \cdot \left( 1 + \frac{X_{2ram}}{X_m} \right) \right]^2 + \left[ \left( \frac{X_1}{R_{2ram}} \right) \cdot \left( 1 + \frac{X_{2ram}}{X_m} \right) + \frac{X_{2ram}}{R_{2ram}} \right]^2 \right]$$

$$B := 2 \cdot A + R' \quad R' = 177.827 \quad (\text{Ohm})$$

$$C1 := 1 + \frac{X_1}{X_m} \quad B = 301.695 \quad (\text{Ohm})$$

$$g := \frac{A - \sqrt{A^2 - C1^2 \cdot R_{2ram} \cdot B}}{B} \quad C1 = 1.033$$

$$g = 0.024$$

**Inductance équivalente:**

$$R_{2eq} := C_1 \cdot R_1 + \frac{C_1^2 \cdot R_{2ram}}{g}$$

$$R_{2eq} = 126.433 \quad (\text{Ohm})$$

$$X_{2eq} := C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_{2ram}$$

$$X_{2eq} = 19.888 \quad (\text{Ohm})$$

$$Z_{2eq} := \sqrt{R_{2eq}^2 + X_{2eq}^2}$$

$$Z_{2eq} = 127.988 \quad (\text{Ohm})$$

**Calcul du courant secondaire:**

$$I''_2 := \frac{U_{n1}}{Z_{2eq}}$$

$$I''_2 = 2.969 \quad (\text{A})$$

**Facteur de puissance rotorique:**

$$\cos\phi'_2 := \frac{R_{2eq}}{Z_{2eq}}$$

$$\cos\phi'_2 = 0.988$$

$$I''_2 := \frac{U_{n1}}{Z_{2eq}}$$

$$I''_2 = 2.969 \quad (\text{A})$$

$$I'_2 := C_1 \cdot I''_2$$

$$I'_2 = 3.066 \quad (\text{A})$$

$$I_{0a} := \frac{P_{a10} + P_{fer} + P_{mec}}{m_1 \cdot U_{n1}}$$

$$I_{0a} = 0.181 \quad (\text{A})$$

**Courant magnétisant:**

$$I_{0r} := \frac{p \cdot F}{0.9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}}$$

$$I_{0r} = 1.696 \quad (\text{A})$$

**Le courant total à vide:**

$$I_0 := \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2}$$

$$I_0 = 1.706 \quad (\text{A})$$

**Courant absorbé:**

$$\sin\phi'_2 := \frac{X_{2eq}}{Z_{2eq}}$$

$$\sin\phi'_2 = 0.155$$

$$I''_{2r} := I''_2 \cdot \sin\phi'_2$$

$$I''_{2r} = 0.461 \quad (\text{A})$$

$$I''_{2a} := I'^2 \cdot \cos\phi'^2$$

$$I''_{2a} = 2.933 \quad (\text{A})$$

$$I_{1r} := I_{0r} + I''_{2r}$$

$$I_{1r} = 2.158 \quad (\text{A})$$

$$I_{1a} := I_{0a} + I''_{2a}$$

$$I_{1a} = 3.114 \quad (\text{A})$$

$$I_1 := \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2}$$

$$I_1 = 3.788 \quad (\text{A})$$

**Facteur de puissance de la machine:**

$$\cos\phi_{21} := \frac{I_{1a}}{I_1}$$

$$\cos\phi_{21} = 0.822$$

**Puissance absorbée par le moteur:**

$$P_a := m_1 \cdot U_{n1} \cdot I_{1a}$$

$$P_a = 3.55 \times 10^3 \quad (\text{W})$$

**Vitesse de rotation du moteur:**

$$N := N_s \cdot (1 - g)$$

$$N = 1.463 \times 10^3 \quad \left( \frac{\text{tr}}{\text{mn}} \right)$$

**Le couple utile sur l'arbre du moteur:**

$$P_n := 3000 \quad (\text{W})$$

$$C_u := \frac{9.55 \cdot P_n}{N}$$

$$C_u = 19.577 \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

**Le rendement:**

$$P_a = 3.55 \times 10^3 \quad (\text{W})$$

$$P_a := 3 \cdot U_{n1} \cdot I_{1a}$$

$$\eta_1 := \frac{P_n}{P_a}$$

$$\eta_1 = 0.845$$

**Résistance équivalente au démarrage:**

$$R_{eqdem} := C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot R_{2demran}$$

$$R_{eqdem} = 14.555 \quad (\text{Ohm})$$

**Réactance équivalente au démarrage:**

$$K_x := 0.0825$$

$$\lambda_{enc1var} := \left( \frac{3 \cdot hf1}{b_{enc11} + 2 \cdot bf1} + \frac{hf1}{bf1} \right) \cdot KB2 \quad \lambda_{enc1var} = 0.506$$

$$\lambda_{1var} := \lambda_{enc1var} + \lambda_{1d}$$

$$\lambda_{enc2var} := \frac{hf2}{bf2} \quad \lambda_{1var} = 2.245$$

$$\lambda_{enc2var} = 0.361$$

$$\lambda_{2var} := \lambda_{enc2var} + \lambda_{2d}$$

$$\lambda_{2var} = 2.464$$

$$X_{var} := \frac{C1 \cdot X1 \cdot \lambda_{1var}}{\lambda_1} + \frac{C1^2 \cdot X_{2ram} \cdot \lambda_{2var}}{\lambda_2} \quad X_{var} = 10.867 \quad (\text{Ohm})$$

$$X_{const} := \frac{C1 \cdot X1 \cdot (\lambda_1 - \lambda_{1var})}{\lambda_1} + \frac{C1^2 X_{2demram} (\lambda_{2d} - \lambda_{2var})}{\lambda_2}$$

$$X_{const} = 1.852 \quad (\text{Ohm})$$

$$X_{eqdem} := X_{const} + K_x \cdot X_{var}$$

$$X_{eqdem} = 2.749 \quad (\text{Ohm})$$

**Capacité de surcharge:**

$$g_{nom} := g$$

$$g_{cr} := C1 \cdot \frac{R_{2ram}}{X1 + C1 \cdot X_{2ram}} \quad g_{cr} = 0.143$$

$$R_{cr} := 2 \cdot R1 \cdot \frac{g_{cr}}{R_{2ram} \cdot C1} \quad R_{cr} = 0.997$$

$$C_s := \frac{\frac{g_{nom}}{g_{cr}} + \frac{g_{cr}}{g_{nom}} + R_{cr}}{2 + R_{cr}} \quad C_s = 2.345$$

**Courant de démarrage:**

$$I_{ld} := \frac{Un1}{\sqrt{R_{eqdem}^2 + X_{eqdem}^2}} \quad I_{ld} = 25.655 \quad (\text{A})$$

$$\frac{I_{ld}}{I_l} = 6.772$$



**Couple de démarrage:**

$$C_{elm}(g) := \frac{p \cdot m1 \cdot Un1^2 \cdot \frac{R2demram}{g}}{2 \cdot \pi \cdot f1 \cdot \left[ \left( C1 \cdot R1 + C1^2 \cdot \frac{R2demram}{g} \right)^2 + Xeqdem^2 \right]}$$

$$C_d := \frac{p \cdot m1 \cdot Un1^2 \cdot R2demram}{2 \cdot \pi \cdot f1 \cdot (Reqdem^2 + Xeqdem^2)} \quad C_d = 54.723 \quad (N \cdot m)$$

$$\frac{C_d}{C_u} = 2.795$$

**Couple maximum:**

$$gC_{max} := \frac{C1^2 \cdot R2demram}{\sqrt{(C1 \cdot R1)^2 + Xeqdem^2}} \quad gC_{max} = 0.451$$

$$C_{max} := \frac{p \cdot m1 \cdot Un1^2 \cdot \frac{R2demram}{gC_{max}}}{2 \cdot \pi \cdot f1 \cdot \left[ \left( C1 \cdot R1 + C1^2 \cdot \frac{R2demram}{gC_{max}} \right)^2 + Xeqdem^2 \right]} \quad C_{max} = 64.014$$

## PARTIE II

### CALCUL DE L'ECHAUFFEMENT DE LA MACHINE(CALCUL THERMIQUE)

**Calcul de l'écart de température entre la surface intérieur de noyau statorique et celle de l'air à l'intérieur du moteur:**

$$K0 := \quad \alpha1 := 15 \cdot 10^{-5} \quad K := 0.22$$

$$\Delta\theta_{surf} := K \cdot \frac{\frac{K0 \cdot 2 \cdot Li \cdot Pj1}{Lw1} + P_{fer}}{\pi \cdot D1 \cdot Li \cdot \alpha1} \quad \Delta\theta_{surf} = 10.496 \quad ^\circ C$$

**Calcul de la chute de température dans l'isolation de la partie d'encoche de l'enroulement statorique:**

$$j_{fr} := 2 \cdot h_1 + b_{enc11} + \pi \cdot \frac{b_{enc12}}{2} \quad j_{fr} = 38.593 \quad \frac{diso}{dnu} = 1.098$$

$$\Gamma_{eq} \equiv 16 \cdot 10^{-5} \quad \Gamma'_{eq} \equiv 18 \cdot 10^{-4}$$

$$\Delta\theta_{iso} := \left( \frac{K_0 \cdot P_{j1} \cdot \frac{2 \cdot Li}{L_{w1}}}{j_{fr} \cdot Z_1 \cdot Li} \right) \cdot \left( \frac{e_1}{\Gamma_{eq}} + \frac{b_{enc11} + b_{enc12}}{16 \cdot \Gamma'_{eq}} \right) \quad \Delta\theta_{iso} = 3.087 \quad ^\circ C$$

**Calcul de l'augmentation de température dans la surface extérieur des parties frontales sur la température de l'air à l'intérieur du moteur:**

$$h_{axe} \leq 132 \quad L_{fr1} := (0.19 + 0.1 \cdot p) \cdot b_{lmoy} + 10 \quad L_{fr1} = 43.12 \quad (mm)$$

$$\Delta\theta_{fr1} := \frac{K \cdot K_0 \cdot P_{j1} \cdot \frac{2 \cdot L_{f1}}{L_{w1}}}{2 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot L_{fr1} \cdot \alpha_1} \quad \Delta\theta_{fr1} = 11.492 \quad ^\circ C$$

**Calcul de la chute de température dans l'isolation des parties frontales de l'enroulement statorique:**

$$\Delta\theta_{isofr1} := \left( \frac{K_0 \cdot P_{j1} \cdot \frac{2 \cdot L_{f1}}{L_{w1}}}{2 \cdot j_{fr} \cdot L_{f1} \cdot Z_1} \right) \cdot \left( \frac{h_1}{12 \cdot \Gamma'_{eq}} \right) \quad \Delta\theta_{isofr1} = 0.262 \quad ^\circ C$$

**La valeur moyenne de l'augmentation de la température de l'enroulement statorique sur la température de l'air à l'intérieur du moteur:**

$$\Delta\theta'1 := (\Delta\theta_{surf} + \Delta\theta_{iso}) \cdot \frac{2 \cdot Li}{L_{w1}} + (\Delta\theta_{fr1} + \Delta\theta_{isofr1}) \cdot \frac{2 \cdot L_{f1}}{L_{w1}} \quad \Delta\theta'1 = 12.769 \quad (^\circ C)$$

**Surface conventionnelle de refroidissement du moteur :**

$$h_p := 20 \quad n_p := 16.3 \quad h_{pnp} := 300$$

$$S_{mot} := (\pi D_{ext1} + 8 h_{pnp})(Li + 2 L_{fr1}) \quad S_{mot} = 7.351 \times 10^5 \quad (^\circ C)$$

**Pertes transmises dans l'air à l'intérieur du moteur :**

$$P' := P_{total} - (K_0 - 1)(P_{j1} + P_{j2}) \quad P' = 623.031 \quad (w)$$

$$P_{\text{elsurf}} := K_0 \cdot P_{j1} \cdot \frac{2 \cdot L_i}{L_{w1}} \quad P_{\text{elsurf}} = 249.498 \quad (\text{w})$$

$$P_{\text{air}} := P' - (1 - K)(P_{\text{elsurf}} + P_{\text{fer}}) - 0.9 P_{\text{mec}} \quad P_{\text{air}} = 331.127 \quad (\text{w})$$

**Ecart moyen de température entre l'air à l'intérieur du moteur et la température du milieu réfrigérant :**

$$\alpha_{\text{air}} := 2.22 \cdot 10^{-5}$$

$$\Delta \theta_{\text{air}} := \frac{P_{\text{air}}}{S_{\text{mot}} \cdot \alpha_{\text{air}}} \quad \Delta \theta_{\text{air}} = 20.29 \quad (^\circ\text{C})$$

**Ecart moyen de température de l'enroulement statorique et la température du milieu réfrigérant:**

$$\Delta \theta_1 := \Delta \theta'_1 + \Delta \theta_{\text{air}} \quad \Delta \theta_1 = 33.058 \quad (^\circ\text{C})$$

**Température moyenne de l'enroulement statorique:**

$$\theta_{\text{enr1}} := \Delta \theta_1 + 40 \quad \theta_{\text{enr1}} = 73.058 \quad (^\circ\text{C})$$

## CALCUL DE LA VENTILATION

**Calcul :**

**Dimensions :  
Débit d'air du ventilateur :**

$$h_{\text{axe}} := 100 \quad D_{v2} := 1.6 \cdot h_{\text{axe}} \quad D_{v2} = 160 \quad M_t := 1.8$$

$$Q_b := 0.9 \cdot 10^{-3} \cdot M_t \cdot P_{\text{air}} \cdot \frac{\sqrt{N \cdot 10^{-3} \cdot D_{v2} \cdot 10^{-2}}}{\Delta \theta_{\text{air}}} \quad Q_b = 0.04$$

**Vitesse linéaire périphérique des ailettes:**

$$V_e := \pi \cdot D_{v2} \cdot \frac{N}{60 \cdot 10^3} \quad V_e = 12.26 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**Surface transversale du canal entre les palettes à la sortie d'air:**

$$S_p := 2 \cdot 10^6 \cdot \frac{Q_b}{0.45 \cdot V_e} \quad S_p = 1.467 \times 10^4 \quad (\text{mm}^2)$$

**Résistance aérodynamique de la chaîne de ventilation:**

$$Z := \frac{12.3 \cdot (N \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_{\text{ext}} \cdot 10^{-2})^2}{Q_b^2} \quad Z = 3.384 \times 10^4 \quad (\text{Ohm})$$

**Vitesse à l'intérieur de l'ailette:**

$$V_1 := \sqrt{V_e^2 - 1.85 \cdot Z \cdot Q_b^2} \quad V_1 = 6.917$$

**Nombre d'ailettes:**

$$N_p = 52$$



## Calcul de la masse

### Calcul du moment d'inertie dynamique:

$$Jid := 0.65 \cdot D2^4 \cdot Li \cdot 10^{-12}$$

$$Jid = 8.56 \times 10^{-3}$$

### La masse du conducteur isolé de l'enroulement:

$$T1moy := \pi \cdot \frac{D1 + henc1}{Z1}$$

$$Y1moy := \tau p$$

$$T1moy = 8.988$$

$$b1moy := T1moy \cdot Y1moy$$

$$b1moy = 80.889$$

$$Lf1 = 137.289$$

$$L1moy := 2(Li + Lf1)$$

$$L1moy = 616.985$$

C : nombre de conducteur élémentaire

C équivaux à Nel

$$C := 2$$

S : la section d'un conducteur sans isolation

S équivaux à Selt1

$$S := 0.245$$

$$Mcu := \left[ 7.55 + 1.35 \cdot \left( \frac{diso}{dnu} \right)^2 \right] \cdot Z1 \cdot \frac{Uen1}{2} \cdot L1moy \cdot C \cdot S \cdot 10^{-6}$$

$$Mcu = 4.947 \quad (Kg)$$

### La masse de l'aluminium de l'enroulement à cage de rotor:

$$Mal2 := 2.7 \cdot (Z2 \cdot Li \cdot Sb + 2 \cdot \pi \cdot Dan \cdot San) \cdot 10^{-6}$$

$$Mal2 = 1.123 \quad (Kg)$$

### La masse du noyau statorique et rotorique:

$$M12 := 7.8 \cdot Li \cdot kfer \cdot \left[ 0.785 \cdot (Dext1^2 - D2^2) - Z1 \cdot Senc1 - Z2 \cdot Sb \right] \cdot 10^{-6}$$

$$M12 = 6.966 \quad (Kg)$$

$$M123 := Mcu + M12 + Mal2$$

$$M123 = 13.036$$

## Caractéristiques de la machine:

$$\eta_n := 0.83 \quad \text{Dext1} := 145 \quad N_s := 1500$$

$$K_t := 1.3 \cdot (1 - \text{Dext1} \cdot 10^{-3})$$

$$K_t = 1.111$$

$$\text{Pour } 2p > 2$$

$$P_{mec} := K_t \cdot (N_s \cdot 10^{-3})^2 \cdot (\text{Dext1} \cdot 10^{-2})^3 \quad P_{mec} = 7.624 \quad (w)$$

$$P_n := 1, 10 \dots 3500$$

$$P_{sup}(P_n) := 0.005 \cdot \frac{P_n}{\eta_n} \quad (w)$$

$$P'2(P_n) := P_n + P_{sup}(P_n) + P_{mec} \quad (w)$$

$$P_{sup}(P_n) =$$

|                        |
|------------------------|
| 6.024·10 <sup>-3</sup> |
| 0.06                   |
| 0.114                  |
| 0.169                  |
| 0.223                  |
| 0.277                  |
| 0.331                  |
| 0.386                  |
| 0.44                   |
| 0.494                  |
| 0.548                  |
| 0.602                  |
| 0.657                  |
| 0.711                  |
| 0.765                  |
| 0.819                  |

$$P'2(P_n) =$$

|         |
|---------|
| 8.63    |
| 17.684  |
| 26.739  |
| 35.793  |
| 44.847  |
| 53.901  |
| 62.956  |
| 72.01   |
| 81.064  |
| 90.118  |
| 99.172  |
| 108.227 |
| 117.281 |
| 126.335 |
| 135.389 |
| 144.444 |

$$A(P_n) := -R1 + \frac{3 \cdot U_n l^2}{2 \cdot P'2(P_n)}$$

$$B(P_n) := 2 A(P_n) + R'$$

$$g_{eq}(P_n) := \frac{A(P_n) - \sqrt{A(P_n)^2 - C1^2 \cdot R2_{ram} \cdot B(P_n)}}{B(P_n)}$$

$$R2_{eq}(P_n) := C1 \cdot R1 + \frac{C1^2 \cdot R2_{ram}}{g_{eq}(P_n)} \qquad Z2_{eq}(P_n) := \sqrt{R2_{eq}(P_n)^2 + X2_{eq}^2}$$

$$I''2(P_n) := \frac{Un1}{Z2_{eq}(P_n)} \qquad \cos\phi'2(P_n) := \frac{R2_{eq}(P_n)}{Z2_{eq}(P_n)}$$

$$I''2a(P_n) := I''2(P_n) \cdot \cos\phi'2(P_n) \qquad I0a := \frac{Pa10 + P_{fer} + P_{mec}}{3 \cdot Un1}$$

$$I1a(P_n) := I0a + I''2a(P_n)$$

$$\sin\phi2(P_n) := \frac{X2_{eq}}{Z2_{eq}(P_n)} \qquad I''2r(P_n) := I''2(P_n) \cdot \sin\phi2(P_n)$$

$$I0r := \frac{p \cdot F}{0.9 \cdot m1 \cdot W1 \cdot Ken1} \qquad I1r(P_n) := I0r + I''2r(P_n)$$

$$I1(P_n) := \sqrt{I1a(P_n)^2 + I1r(P_n)^2}$$

R2eq(Pn) =

|    | 0         |
|----|-----------|
| 0  | 5.018·104 |
| 1  | 2.448·104 |
| 2  | 1.619·104 |
| 3  | 1.209·104 |
| 4  | 9.647·103 |
| 5  | 8.025·103 |
| 6  | 6.869·103 |
| 7  | 6.004·103 |
| 8  | 5.332·103 |
| 9  | 4.795·103 |
| 10 | 4.356·103 |
| 11 | 3.99·103  |
| 12 | 3.681·103 |
| 13 | 3.417·103 |
| 14 | 3.187·103 |
| 15 | 2.987·103 |

Z2eq(Pn) =

|    | 0         |
|----|-----------|
| 0  | 5.018·104 |
| 1  | 2.448·104 |
| 2  | 1.619·104 |
| 3  | 1.209·104 |
| 4  | 9.647·103 |
| 5  | 8.025·103 |
| 6  | 6.869·103 |
| 7  | 6.004·103 |
| 8  | 5.332·103 |
| 9  | 4.795·103 |
| 10 | 4.356·103 |
| 11 | 3.991·103 |
| 12 | 3.681·103 |
| 13 | 3.417·103 |
| 14 | 3.187·103 |
| 15 | 2.987·103 |



$$g_{eq}(P_n) =$$

|    | 0                      |
|----|------------------------|
| 0  | 5.656·10 <sup>-5</sup> |
| 1  | 1.159·10 <sup>-4</sup> |
| 2  | 1.754·10 <sup>-4</sup> |
| 3  | 2.349·10 <sup>-4</sup> |
| 4  | 2.944·10 <sup>-4</sup> |
| 5  | 3.54·10 <sup>-4</sup>  |
| 6  | 4.137·10 <sup>-4</sup> |
| 7  | 4.734·10 <sup>-4</sup> |
| 8  | 5.332·10 <sup>-4</sup> |
| 9  | 5.93·10 <sup>-4</sup>  |
| 10 | 6.529·10 <sup>-4</sup> |
| 11 | 7.129·10 <sup>-4</sup> |
| 12 | 7.729·10 <sup>-4</sup> |
| 13 | 8.329·10 <sup>-4</sup> |
| 14 | 8.93·10 <sup>-4</sup>  |
| 15 | 9.532·10 <sup>-4</sup> |

$$I''^2(P_n) =$$

|    | 0                      |
|----|------------------------|
| 0  | 7.572·10 <sup>-3</sup> |
| 1  | 0.016                  |
| 2  | 0.023                  |
| 3  | 0.031                  |
| 4  | 0.039                  |
| 5  | 0.047                  |
| 6  | 0.055                  |
| 7  | 0.063                  |
| 8  | 0.071                  |
| 9  | 0.079                  |
| 10 | 0.087                  |
| 11 | 0.095                  |
| 12 | 0.103                  |
| 13 | 0.111                  |
| 14 | 0.119                  |
| 15 | 0.127                  |

$$I_l(P_n) := \sqrt{I_{la}(P_n)^2 + I_{lr}(P_n)^2} \quad (A)$$

$$I_{la}(P_n) =$$

|    | 0     |
|----|-------|
| 0  | 0.186 |
| 1  | 0.194 |
| 2  | 0.202 |
| 3  | 0.21  |
| 4  | 0.218 |
| 5  | 0.226 |
| 6  | 0.234 |
| 7  | 0.242 |
| 8  | 0.25  |
| 9  | 0.258 |
| 10 | 0.266 |
| 11 | 0.274 |
| 12 | 0.282 |
| 13 | 0.29  |
| 14 | 0.298 |
| 15 | 0.306 |

$$I_{lr}(P_n) =$$

|    | 0     |
|----|-------|
| 0  | 1.696 |
| 1  | 1.696 |
| 2  | 1.696 |
| 3  | 1.696 |
| 4  | 1.696 |
| 5  | 1.696 |
| 6  | 1.696 |
| 7  | 1.696 |
| 8  | 1.696 |
| 9  | 1.697 |
| 10 | 1.697 |
| 11 | 1.697 |
| 12 | 1.697 |
| 13 | 1.697 |
| 14 | 1.697 |
| 15 | 1.697 |

$$I_l(P_n) =$$

|    | 0     |
|----|-------|
| 0  | 1.706 |
| 1  | 1.707 |
| 2  | 1.708 |
| 3  | 1.709 |
| 4  | 1.71  |
| 5  | 1.711 |
| 6  | 1.712 |
| 7  | 1.714 |
| 8  | 1.715 |
| 9  | 1.716 |
| 10 | 1.717 |
| 11 | 1.719 |
| 12 | 1.72  |
| 13 | 1.721 |
| 14 | 1.723 |
| 15 | 1.724 |

$$I_{n1}(P_n) := \frac{P_n}{3 \cdot U_{n1} \cdot \cos(\phi_n) \cdot \eta_n}$$

$$I_2(P_n) := \frac{1.11 \cdot I_{n1}(P_n) \cdot 2 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot \cos(\phi_n) \cdot K_{en1}}{Z_2}$$

$$\cos\phi_{21}(P_n) := \frac{I_{1a}(P_n)}{I_1(P_n)}$$

$$P_{j1}(P_n) := m_1 \cdot I_{n1}(P_n)^2 \cdot R_1$$

$$P_{j2}(P_n) := m_2 \cdot I_{n2}(P_n)^2 \cdot R_2$$

$$\cos\phi_{21}(P_n) =$$

|    |       |
|----|-------|
|    | 0     |
| 0  | 0.109 |
| 1  | 0.114 |
| 2  | 0.118 |
| 3  | 0.123 |
| 4  | 0.128 |
| 5  | 0.132 |
| 6  | 0.137 |
| 7  | 0.141 |
| 8  | 0.146 |
| 9  | 0.15  |
| 10 | 0.155 |
| 11 | 0.159 |
| 12 | 0.164 |
| 13 | 0.168 |
| 14 | 0.173 |
| 15 | 0.177 |

$$P_{j1}(P_n) =$$

|    |            |
|----|------------|
|    | 0          |
| 0  | 4.668·10-5 |
| 1  | 4.668·10-3 |
| 2  | 0.017      |
| 3  | 0.037      |
| 4  | 0.064      |
| 5  | 0.099      |
| 6  | 0.141      |
| 7  | 0.191      |
| 8  | 0.249      |
| 9  | 0.314      |
| 10 | 0.387      |
| 11 | 0.467      |
| 12 | 0.555      |
| 13 | 0.65       |
| 14 | 0.753      |
| 15 | 0.863      |

$$P_{j2}(P_n) =$$

|    |            |
|----|------------|
|    | 0          |
| 0  | 1.087·10-5 |
| 1  | 1.087·10-3 |
| 2  | 3.925·10-3 |
| 3  | 8.524·10-3 |
| 4  | 0.015      |
| 5  | 0.023      |
| 6  | 0.033      |
| 7  | 0.045      |
| 8  | 0.058      |
| 9  | 0.073      |
| 10 | 0.09       |
| 11 | 0.109      |
| 12 | 0.129      |
| 13 | 0.151      |
| 14 | 0.175      |
| 15 | 0.201      |

$$P_{total}(P_n) := P_{j1}(P_n) + P_{j2}(P_n) + P_{fer} + P_{mec} + P_{sup}(P_n)$$

$$\eta(P_n) := \frac{P_n}{P_n + P_{total}(P_n)}$$

$$P_1(P_n) := P_n + P_{total}(P_n)$$

$$Cu(P_n) =$$

|            |
|------------|
| 6.367·10-3 |
| 0.064      |
| 0.121      |
| 0.178      |
| 0.236      |
| 0.293      |
| 0.35       |
| 0.408      |
| 0.465      |
| 0.522      |
| 0.58       |
| 0.637      |
| 0.695      |

$$Pe := 4.461$$

$$Cu(P_n) := \frac{9.55 \cdot P_n}{Ns \cdot (1 - geq(P_n))}$$

$$Cu = 19.577$$

$$P_n := 0,50 \dots 3500$$

$$\eta(P_n) =$$

|       |
|-------|
| 0     |
| 0.292 |
| 0.45  |
| 0.549 |
| 0.617 |
| 0.665 |
| 0.701 |
| 0.729 |
| 0.751 |
| 0.769 |
| 0.783 |
| 0.795 |
| 0.805 |
| 0.813 |
| 0.82  |
| 0.826 |

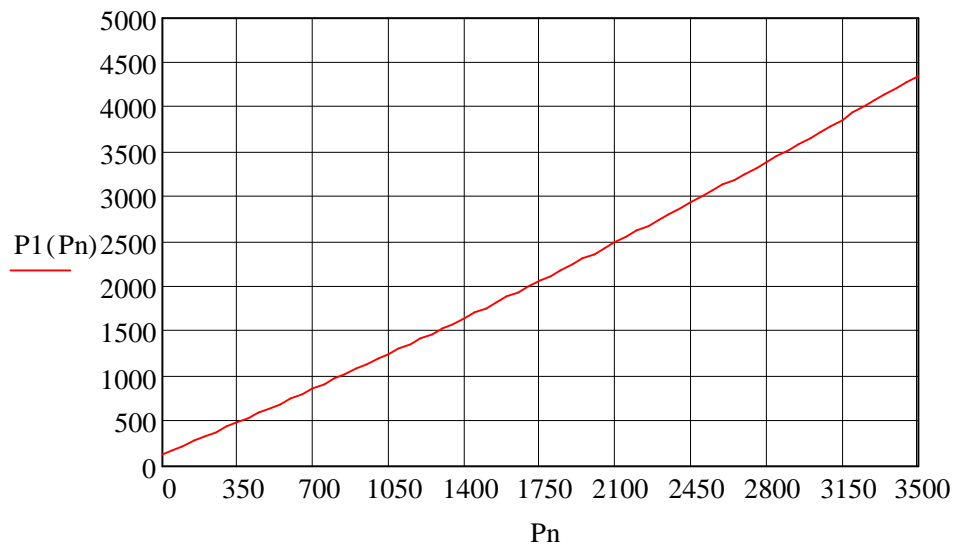
$$P_{total}(P_n) =$$

|    |         |
|----|---------|
|    | 0       |
| 0  | 120.886 |
| 1  | 121.331 |
| 2  | 122.064 |
| 3  | 123.084 |
| 4  | 124.393 |
| 5  | 125.989 |
| 6  | 127.873 |
| 7  | 130.045 |
| 8  | 132.505 |
| 9  | 135.252 |
| 10 | 138.287 |
| 11 | 141.61  |
| 12 | 145.221 |
| 13 | 149.119 |
| 14 | 153.305 |
| 15 | 157.78  |

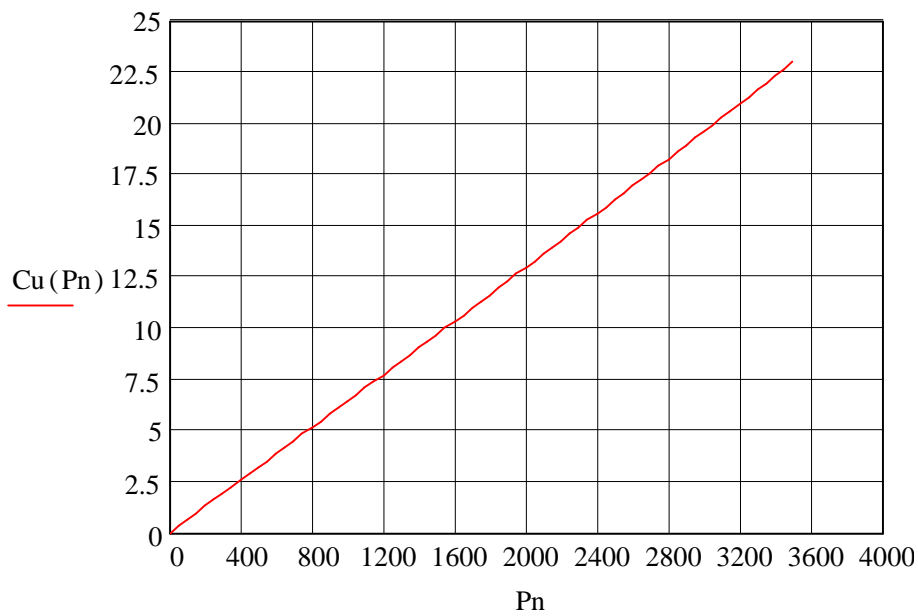
$$P_1(P_n) =$$

|    |         |
|----|---------|
|    | 0       |
| 0  | 120.886 |
| 1  | 171.331 |
| 2  | 222.064 |
| 3  | 273.084 |
| 4  | 324.393 |
| 5  | 375.989 |
| 6  | 427.873 |
| 7  | 480.045 |
| 8  | 532.505 |
| 9  | 585.252 |
| 10 | 638.287 |
| 11 | 691.61  |
| 12 | 745.221 |
| 13 | 799.119 |
| 14 | 853.305 |
| 15 | 907.78  |

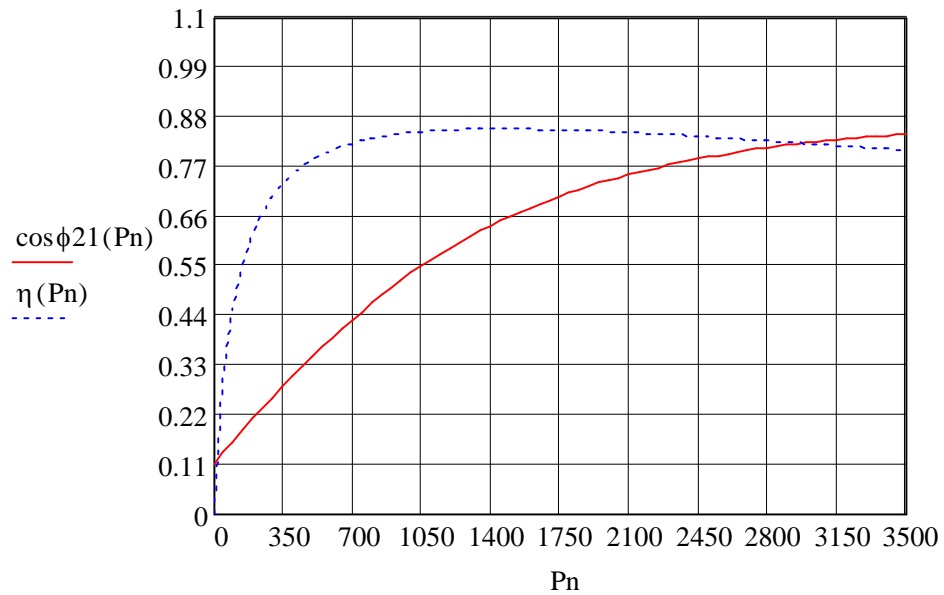
**Courbe1 : la puissance absorbé en fonction de la puissance nominale.**



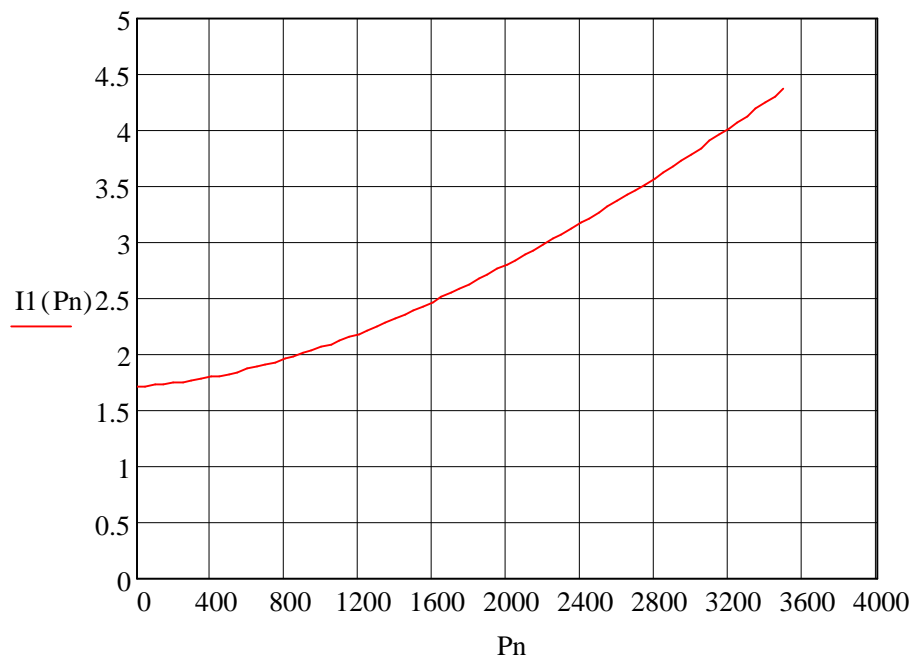
**Courbe 2: le couple utile en fonction de la puissance nominale.**



**Courbe 3: le facteur de puissance et le rendement en fonction de la puissance nominale.**



**courbe 4: Le courant absorbé en fonction de la puissance nominale:**



$$\text{Celm(N)} := \frac{p \cdot m1 \cdot \text{Un1}^2 \cdot \frac{N_s \cdot R2\text{demram}}{N_s - N}}{2 \cdot \pi \cdot f1 \cdot \left[ \left( C1 \cdot R1 + C1^2 \cdot \frac{N_s \cdot R2\text{demram}}{N_s - N} \right)^2 + \text{Xeqdem}^2 \right]}$$

$$\text{Cd} := \frac{p \cdot m1 \cdot \text{Un1}^2 \cdot R2\text{demram}}{2 \cdot \pi \cdot f1 \cdot \left[ \left( C1 \cdot R1 + C1^2 \cdot R2\text{demram} \right)^2 + \text{Xeqdem}^2 \right]} \quad \text{Cd} = 54.723$$

$$\text{Ild} := \frac{\text{Un1}}{\sqrt{\left( C1 \cdot R1 + C1^2 \cdot R2\text{demram} \right)^2 + \text{Xeqdem}^2}} \quad \text{Ild} = 25.655$$

$$\text{Ild(N)} := \frac{\text{Un1}}{\sqrt{\left( C1 \cdot R1 + C1^2 \cdot \frac{N_s \cdot R2\text{demram}}{N_s - N} \right)^2 + \text{Xeqdem}^2}}$$

N := 0.000001, 3 .. 1550

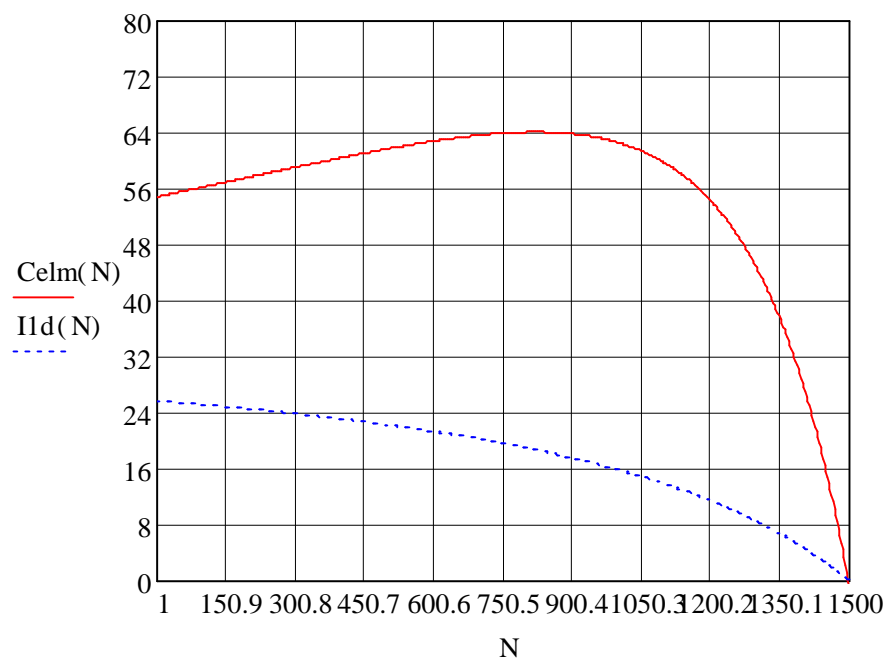
Celm(N) =

|        |
|--------|
| 54.723 |
| 54.765 |
| 54.807 |
| 54.85  |
| 54.892 |
| 54.934 |
| 54.976 |
| 55.018 |
| 55.06  |
| 55.102 |
| 55.145 |
| 55.187 |
| 55.229 |
| 55.271 |
| 55.314 |
| 55.356 |

Ild(N) =

|        |
|--------|
| 25.655 |
| 25.639 |
| 25.623 |
| 25.607 |
| 25.591 |
| 25.575 |
| 25.559 |
| 25.543 |
| 25.527 |
| 25.511 |
| 25.494 |
| 25.478 |
| 25.462 |
| 25.445 |
| 25.429 |
| 25.413 |

Courbe 5: Le couple électromagnétique en fonction de la vitesse N:



$g := 0.00001, 0.0025 .. 1$

$$Celm(g) := \frac{p \cdot m1 \cdot Un1^2 \cdot \frac{R2demram}{g}}{2 \cdot \pi \cdot f1 \cdot \left[ \left( C1 \cdot R1 + C1^2 \cdot \frac{R2demram}{g} \right)^2 + Xeqdem^2 \right]}$$

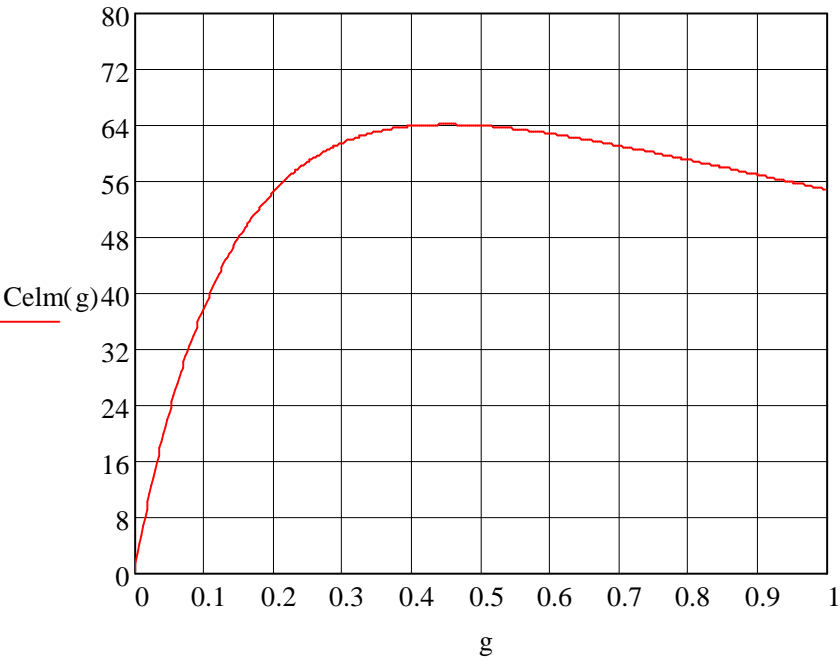
Celm(g) =

|                        |
|------------------------|
| 5.569·10 <sup>-3</sup> |
| 1.378                  |
| 2.721                  |
| 4.036                  |
| 5.323                  |
| 6.584                  |
| 7.819                  |
| 9.027                  |
| 10.211                 |
| 11.37                  |
| 12.505                 |
| 13.617                 |
| 14.706                 |
| 15.772                 |
| 16.816                 |
| 17.839                 |

ction nominale ( $S_{nom}$ ) en mm

Diamètre nu ( $d_{nu}$ ) en mm

Diamètre avec isolation ( $d_{iso}$ ) en mm





|                |              |              |
|----------------|--------------|--------------|
| <b>0.00785</b> | <b>0.1</b>   | <b>0.125</b> |
| <b>0.00882</b> | <b>0.106</b> | <b>0.131</b> |
| <b>0.00985</b> | <b>0.112</b> | <b>0.139</b> |
| <b>0.01094</b> | <b>0.118</b> | <b>0.145</b> |
| <b>0.01227</b> | <b>0.125</b> | <b>0.153</b> |
| <b>0.01368</b> | <b>0.132</b> | <b>0.161</b> |
| <b>0.01539</b> | <b>0.14</b>  | <b>0.170</b> |
| <b>0.01767</b> | <b>0.15</b>  | <b>0.181</b> |
| <b>0.02011</b> | <b>0.16</b>  | <b>0.192</b> |
| <b>0.02270</b> | <b>0.17</b>  | <b>0.203</b> |
| <b>0.02545</b> | <b>0.18</b>  | <b>0.215</b> |
| <b>0.02835</b> | <b>0.19</b>  | <b>0.225</b> |
| <b>0.03142</b> | <b>0.2</b>   | <b>0.236</b> |
| <b>0.03530</b> | <b>0.217</b> | <b>0.250</b> |
| <b>0.03941</b> | <b>0.224</b> | <b>0.262</b> |
| <b>0.04374</b> | <b>0.236</b> | <b>0.276</b> |
| <b>0.04909</b> | <b>0.25</b>  | <b>0.290</b> |
| <b>0.05515</b> | <b>0.265</b> | <b>0.307</b> |
| <b>0.06158</b> | <b>0.28</b>  | <b>0.322</b> |
| <b>0.07069</b> | <b>0.30</b>  | <b>0.344</b> |
| <b>0.07793</b> | <b>0.315</b> | <b>0.360</b> |
| <b>0.08814</b> | <b>0.335</b> | <b>0.381</b> |
| <b>0.09898</b> | <b>0.355</b> | <b>0.403</b> |
| <b>0.1104</b>  | <b>0.375</b> | <b>0.424</b> |
| <b>0.1257</b>  | <b>0.4</b>   | <b>0.450</b> |
| <b>0.1419</b>  | <b>0.425</b> | <b>0.478</b> |

|        |       |        |
|--------|-------|--------|
| 0.1590 | 0.45  | 0.503  |
| 0.1772 | 0.475 | 0.531  |
| 0.1964 | 0.5   | 0.556  |
| 0.2124 | 0.52  | 0.576  |
| 0.2206 | 0.53  | 0.587  |
| 0.2463 | 0.56  | 0.619  |
| 0.2642 | 0.58  | 0.640  |
| 0.2827 | 0.6   | 0.661  |
| 0.3117 | 0.63  | 0.692  |
| 0.3318 | 0.65  | 0.713  |
| 0.3526 | 0.67  | 0.735  |
| 0.3959 | 0.71  | 0.776  |
| 0.4418 | 0.75  | 0.817  |
| 0.4778 | 0.78  | 0.848  |
| 0.5027 | 0.8   | 0.869  |
| 0.5281 | 0.82  | 0.890  |
| 0.5674 | 0.85  | 0.921  |
| 0.6082 | 0.88  | 0.952  |
| 0.6362 | 0.9   | 0.973  |
| 0.7088 | 0.95  | 1.0.24 |
| 0.7854 | 1.00  | 1.076  |
| 0.8825 | 1.06  | 1.137  |
| 0.9852 | 1.12  | 1.199  |

**Tableau A<sub>1</sub> : Sections normalisées**

**TABLEAU A<sub>2</sub> : Intensité du champ magnétique dans la culasse qui correspond Bc1 et Bc2.**

| <b>B(H)</b> | <b>0.00</b> | <b>0.01</b> | <b>0.02</b> | <b>0.03</b> | <b>0.04</b> | <b>0.05</b> | <b>0.06</b> | <b>0.07</b> | <b>0.08</b> | <b>0.09</b> |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>0.4</b>  | <b>52</b>   | <b>53</b>   | <b>54</b>   | <b>55</b>   | <b>56</b>   | <b>57</b>   | <b>58</b>   | <b>59</b>   | <b>60</b>   | <b>62</b>   |
| <b>0.5</b>  | <b>64</b>   | <b>65</b>   | <b>66</b>   | <b>67</b>   | <b>69</b>   | <b>71</b>   | <b>72</b>   | <b>74</b>   | <b>76</b>   | <b>79</b>   |
| <b>0.6</b>  | <b>80</b>   | <b>81</b>   | <b>83</b>   | <b>85</b>   | <b>87</b>   | <b>89</b>   | <b>91</b>   | <b>93</b>   | <b>95</b>   | <b>97</b>   |
| <b>0.7</b>  | <b>100</b>  | <b>102</b>  | <b>104</b>  | <b>106</b>  | <b>108</b>  | <b>111</b>  | <b>113</b>  | <b>115</b>  | <b>118</b>  | <b>121</b>  |
| <b>0.8</b>  | <b>124</b>  | <b>126</b>  | <b>129</b>  | <b>132</b>  | <b>135</b>  | <b>138</b>  | <b>140</b>  | <b>143</b>  | <b>146</b>  | <b>149</b>  |
| <b>0.9</b>  | <b>152</b>  | <b>155</b>  | <b>158</b>  | <b>161</b>  | <b>164</b>  | <b>168</b>  | <b>171</b>  | <b>174</b>  | <b>177</b>  | <b>181</b>  |
| <b>1.0</b>  | <b>185</b>  | <b>188</b>  | <b>191</b>  | <b>195</b>  | <b>199</b>  | <b>203</b>  | <b>206</b>  | <b>209</b>  | <b>213</b>  | <b>217</b>  |
| <b>1.1</b>  | <b>221</b>  | <b>225</b>  | <b>229</b>  | <b>233</b>  | <b>237</b>  | <b>241</b>  | <b>245</b>  | <b>249</b>  | <b>253</b>  | <b>257</b>  |
| <b>1.2</b>  | <b>262</b>  | <b>267</b>  | <b>272</b>  | <b>277</b>  | <b>283</b>  | <b>289</b>  | <b>295</b>  | <b>301</b>  | <b>307</b>  | <b>313</b>  |
| <b>1.3</b>  | <b>320</b>  | <b>327</b>  | <b>334</b>  | <b>341</b>  | <b>349</b>  | <b>359</b>  | <b>365</b>  | <b>373</b>  | <b>382</b>  | <b>391</b>  |
| <b>1.4</b>  | <b>400</b>  | <b>410</b>  | <b>420</b>  | <b>430</b>  | <b>440</b>  | <b>450</b>  | <b>464</b>  | <b>478</b>  | <b>492</b>  | <b>506</b>  |
| <b>1.5</b>  | <b>520</b>  | <b>542</b>  | <b>564</b>  | <b>586</b>  | <b>608</b>  | <b>630</b>  | <b>654</b>  | <b>678</b>  | <b>702</b>  | <b>726</b>  |
| <b>1.6</b>  | <b>750</b>  | <b>788</b>  | <b>826</b>  | <b>864</b>  | <b>902</b>  | <b>946</b>  | <b>982</b>  | <b>1020</b> | <b>1070</b> | <b>1110</b> |
| <b>1.7</b>  | <b>1150</b> | <b>1220</b> | <b>1290</b> | <b>1360</b> | <b>1430</b> | <b>1500</b> | <b>1600</b> | <b>1700</b> | <b>1800</b> | <b>1900</b> |
| <b>1.8</b>  | <b>2000</b> | <b>2160</b> | <b>2320</b> | <b>2490</b> | <b>2650</b> | <b>2810</b> | <b>2960</b> | <b>3110</b> | <b>3270</b> | <b>3420</b> |
| <b>1.9</b>  | <b>3570</b> | <b>3800</b> | <b>4030</b> | <b>4260</b> | <b>4490</b> | <b>4720</b> | <b>4930</b> | <b>5140</b> | <b>5350</b> | <b>5560</b> |
| <b>2.0</b>  | <b>5770</b> | <b>6000</b> | <b>6300</b> | <b>6600</b> | <b>7000</b> | <b>7400</b> | <b>7900</b> | <b>8409</b> | <b>9000</b> | <b>9700</b> |

**TABLEAU A<sub>3</sub> : l'intensité du champ magnétique dans la dent statorique et rotorique qui Correspond à Bz1 et Bz2.**

| <b>B(H)</b> | <b>0,00</b> | <b>0,01</b> | <b>0,02</b> | <b>0,03</b> | <b>0,04</b> | <b>0,05</b> | <b>0,06</b> | <b>0,07</b> | <b>0,08</b> | <b>0,09</b> |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>0,4</b>  | <b>124</b>  | <b>127</b>  | <b>130</b>  | <b>133</b>  | <b>136</b>  | <b>138</b>  | <b>141</b>  | <b>144</b>  | <b>147</b>  | <b>150</b>  |
| <b>0,5</b>  | <b>154</b>  | <b>157</b>  | <b>160</b>  | <b>164</b>  | <b>167</b>  | <b>171</b>  | <b>174</b>  | <b>177</b>  | <b>180</b>  | <b>184</b>  |
| <b>0,6</b>  | <b>188</b>  | <b>191</b>  | <b>194</b>  | <b>198</b>  | <b>201</b>  | <b>205</b>  | <b>208</b>  | <b>212</b>  | <b>216</b>  | <b>220</b>  |
| <b>0,7</b>  | <b>223</b>  | <b>226</b>  | <b>229</b>  | <b>233</b>  | <b>236</b>  | <b>240</b>  | <b>243</b>  | <b>247</b>  | <b>250</b>  | <b>253</b>  |
| <b>0,8</b>  | <b>256</b>  | <b>259</b>  | <b>262</b>  | <b>265</b>  | <b>268</b>  | <b>271</b>  | <b>274</b>  | <b>277</b>  | <b>280</b>  | <b>283</b>  |
| <b>0,9</b>  | <b>286</b>  | <b>290</b>  | <b>293</b>  | <b>297</b>  | <b>301</b>  | <b>304</b>  | <b>308</b>  | <b>312</b>  | <b>316</b>  | <b>320</b>  |
| <b>1,0</b>  | <b>324</b>  | <b>329</b>  | <b>333</b>  | <b>338</b>  | <b>342</b>  | <b>346</b>  | <b>350</b>  | <b>355</b>  | <b>360</b>  | <b>365</b>  |
| <b>1,1</b>  | <b>370</b>  | <b>375</b>  | <b>380</b>  | <b>385</b>  | <b>391</b>  | <b>396</b>  | <b>401</b>  | <b>406</b>  | <b>411</b>  | <b>417</b>  |
| <b>1,2</b>  | <b>424</b>  | <b>430</b>  | <b>436</b>  | <b>442</b>  | <b>448</b>  | <b>455</b>  | <b>461</b>  | <b>467</b>  | <b>473</b>  | <b>479</b>  |
| <b>1,3</b>  | <b>486</b>  | <b>495</b>  | <b>504</b>  | <b>514</b>  | <b>524</b>  | <b>533</b>  | <b>563</b>  | <b>574</b>  | <b>585</b>  | <b>585</b>  |
| <b>1,4</b>  | <b>586</b>  | <b>595</b>  | <b>610</b>  | <b>622</b>  | <b>634</b>  | <b>646</b>  | <b>658</b>  | <b>670</b>  | <b>683</b>  | <b>696</b>  |
| <b>1,5</b>  | <b>706</b>  | <b>722</b>  | <b>735</b>  | <b>749</b>  | <b>763</b>  | <b>777</b>  | <b>791</b>  | <b>805</b>  | <b>820</b>  | <b>835</b>  |

|            |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>1,6</b> | <b>850</b>   | <b>878</b>   | <b>906</b>   | <b>934</b>   | <b>962</b>   | <b>990</b>   | <b>1020</b>  | <b>1050</b>  | <b>1080</b>  | <b>1110</b>  |
| <b>1,7</b> | <b>1150</b>  | <b>1180</b>  | <b>1220</b>  | <b>1250</b>  | <b>1290</b>  | <b>1330</b>  | <b>1360</b>  | <b>1400</b>  | <b>1440</b>  | <b>1480</b>  |
| <b>1,8</b> | <b>1520</b>  | <b>1570</b>  | <b>1620</b>  | <b>1670</b>  | <b>1720</b>  | <b>1770</b>  | <b>1830</b>  | <b>1890</b>  | <b>1950</b>  | <b>2010</b>  |
| <b>1,9</b> | <b>2070</b>  | <b>2160</b>  | <b>2250</b>  | <b>2320</b>  | <b>2480</b>  | <b>2520</b>  | <b>2640</b>  | <b>2760</b>  | <b>2890</b>  | <b>3020</b>  |
| <b>2,0</b> | <b>3150</b>  | <b>3320</b>  | <b>3500</b>  | <b>3500</b>  | <b>3860</b>  | <b>4040</b>  | <b>4260</b>  | <b>4480</b>  | <b>4700</b>  | <b>4920</b>  |
| <b>2,1</b> | <b>5110</b>  | <b>5440</b>  | <b>5740</b>  | <b>5740</b>  | <b>6360</b>  | <b>6670</b>  | <b>7120</b>  | <b>7570</b>  | <b>8020</b>  | <b>8470</b>  |
| <b>2,2</b> | <b>8920</b>  | <b>9430</b>  | <b>9940</b>  | <b>9940</b>  | <b>10980</b> | <b>11500</b> | <b>12000</b> | <b>12600</b> | <b>13200</b> | <b>13800</b> |
| <b>2,3</b> | <b>14400</b> | <b>15100</b> | <b>15800</b> | <b>16500</b> | <b>17200</b> | <b>18000</b> | <b>18800</b> | <b>19600</b> | <b>20500</b> | <b>21400</b> |

**TABLEAU A<sub>4</sub> : Krr1 en fonction de Q1**

|             |             |               |            |               |               |               |          |          |
|-------------|-------------|---------------|------------|---------------|---------------|---------------|----------|----------|
| <b>Q1</b>   | <b>1 ,5</b> | <b>2</b>      | <b>2,5</b> | <b>3</b>      | <b>4</b>      | <b>5</b>      | <b>6</b> | <b>8</b> |
| <b>Krr1</b> | <b>-</b>    | <b>0,0285</b> | <b>-</b>   | <b>0,0141</b> | <b>0,0065</b> | <b>0,0052</b> | <b>-</b> | <b>-</b> |

**TABLEAU A<sub>5</sub> : Kdd1 en fonction de Z2/P**

| <b>Q1</b> | <b>10</b>   | <b>15</b>   | <b>20</b>   | <b>25</b>   | <b>30</b>   | <b>35</b>   | <b>40</b>   |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>2</b>  | <b>0,99</b> | <b>0,94</b> | <b>-</b>    | <b>-</b>    | <b>-</b>    | <b>-</b>    | <b>-</b>    |
| <b>3</b>  | <b>0,98</b> | <b>0,93</b> | <b>0,88</b> | <b>0,85</b> | <b>-</b>    | <b>-</b>    | <b>-</b>    |
| <b>4</b>  | <b>-</b>    | <b>0,90</b> | <b>0,84</b> | <b>0,80</b> | <b>0,77</b> | <b>-</b>    | <b>-</b>    |
| <b>5</b>  | <b>-</b>    | <b>-</b>    | <b>-</b>    | <b>0,75</b> | <b>0,72</b> | <b>0,70</b> | <b>-</b>    |
| <b>6</b>  | <b>-</b>    | <b>-</b>    | <b>-</b>    | <b>0,70</b> | <b>0,60</b> | <b>0,62</b> | <b>-</b>    |
| <b>8</b>  | <b>-</b>    | <b>-</b>    | <b>-</b>    | <b>-</b>    | <b>-</b>    | <b>0,53</b> | <b>0,51</b> |

**TABLEAU A<sub>6</sub> : K en fonction de (2p)**

|             | <b>2P=2</b> | <b>2P=4</b> | <b>2P=6</b> |
|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>IP44</b> | <b>0,22</b> | <b>0,20</b> | <b>0,19</b> |
| <b>IP23</b> | <b>0,84</b> | <b>0,80</b> | <b>0,78</b> |

**Tableau A.7: Diamètre extérieur statorique  $D_{\text{ext1}}$  des machines asynchrones pour les différentes hauteurs d'axe  $h$  :**

|                       |         |         |         |         |         |     |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-----|
| $h$ , mm              | 56      | 63      | 71      | 80      | 90      |     |
| $D_{\text{ext}}$ , mm | 81      | 110-108 | 116-122 | 131-139 | 149-157 |     |
| $h$ , mm              | 100     | 112     | 132     | 160     | 180     |     |
| $D_{\text{ext}}$ , mm | 168-175 | 191-197 | 225-233 | 272-285 | 313-322 |     |
| $h$ , mm              | 200     | 225     | 250     | 280     | 315     | 255 |
| $D_{\text{ext}}$ , mm | 349-359 | 392-406 | 437-452 | 520-530 | 590     | 660 |

**Tableau A.8: Coefficients  $k_d$  en fonction du nombre de pôles  $2P$  :**

|       |          |           |          |           |           |
|-------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| $2P$  | 2        | 4         | 6        | 8         | 10-12     |
| $k_d$ | 0,52-0,6 | 0,62-0,68 | 0,7-0,72 | 0,72-0,75 | 0,75-0,77 |

Fig 1.1

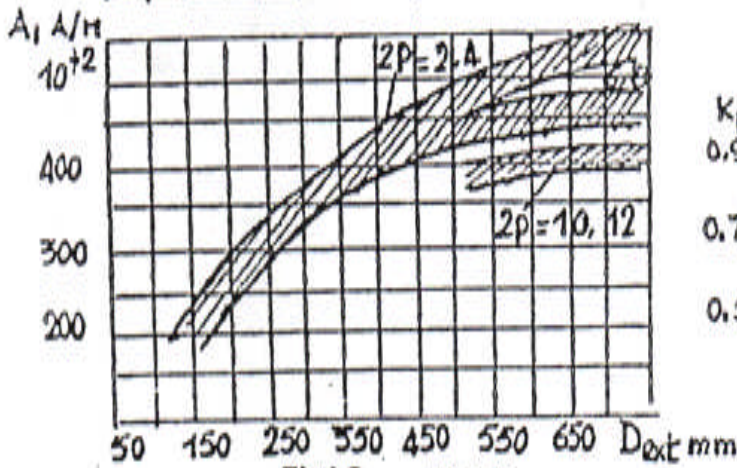
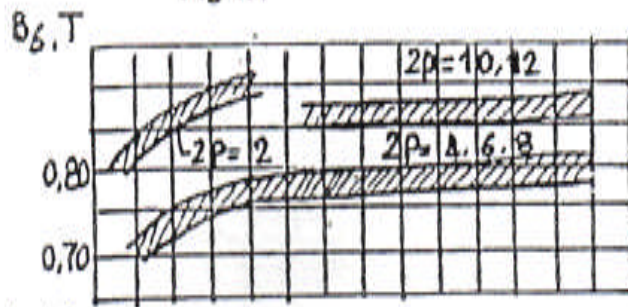


Fig 1.2 Fig 1.3

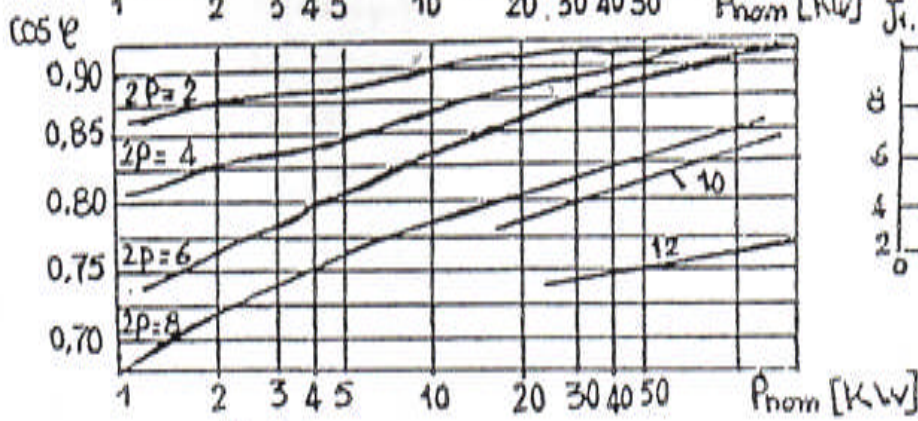
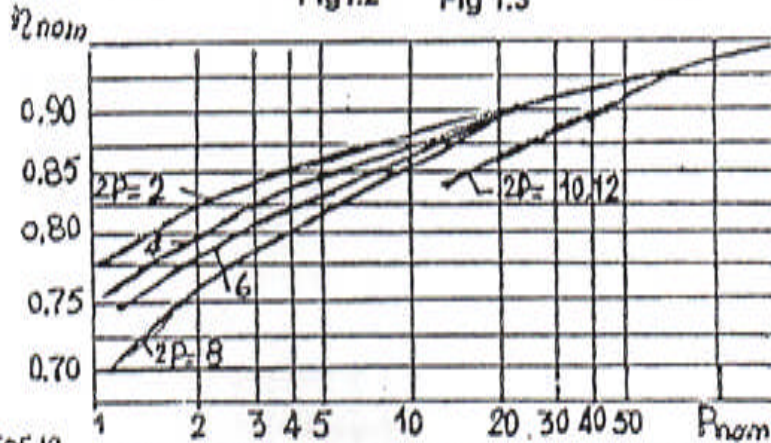


Fig 1.4

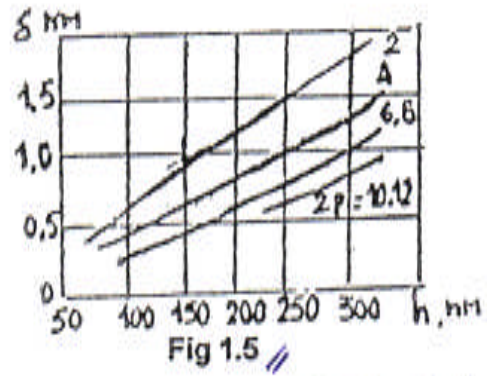


Fig 1.5 //

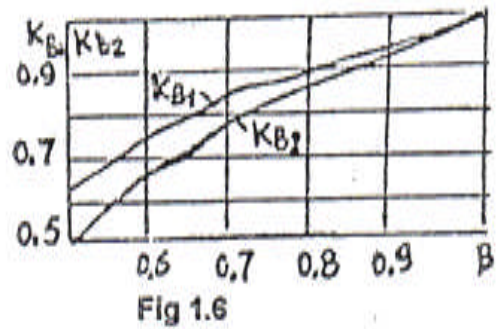


Fig 1.6

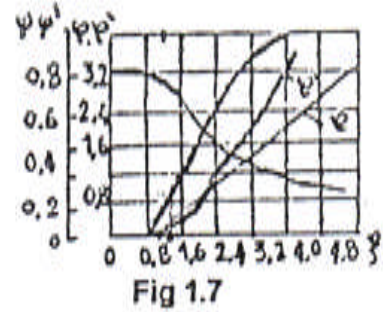


Fig 1.7

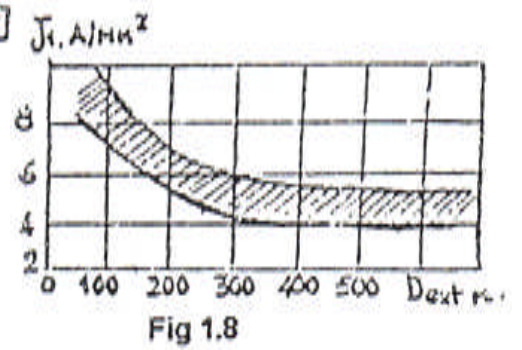


Fig 1.8



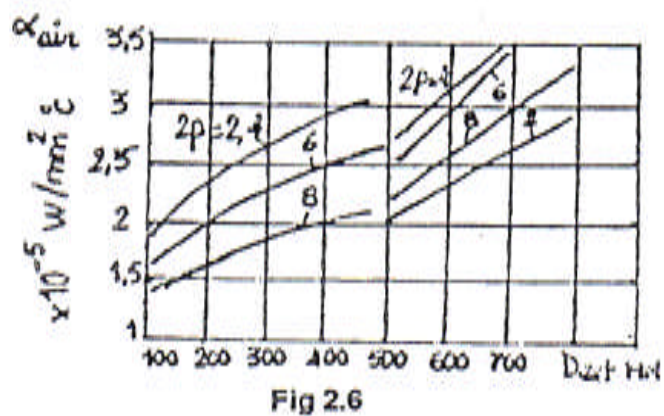
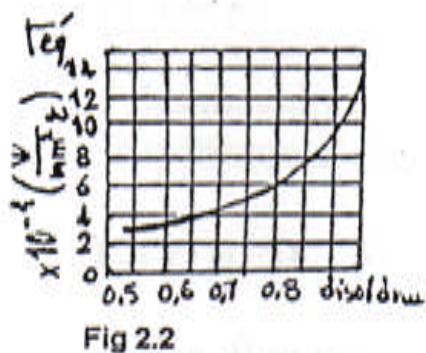
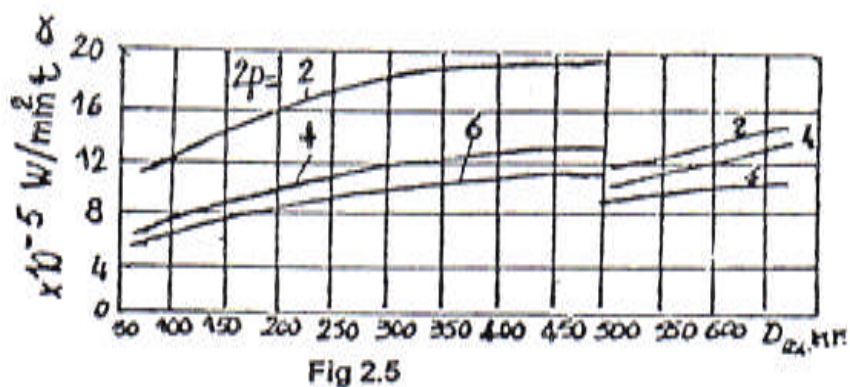
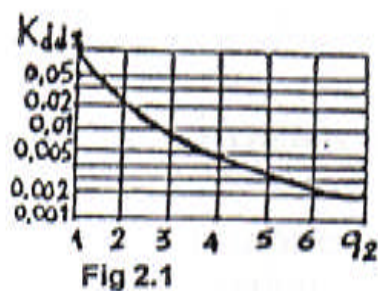
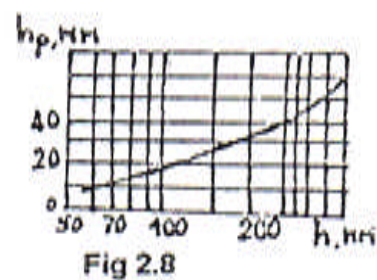
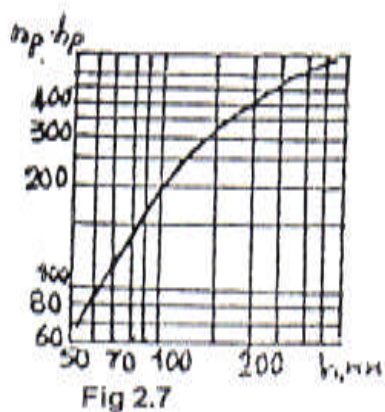
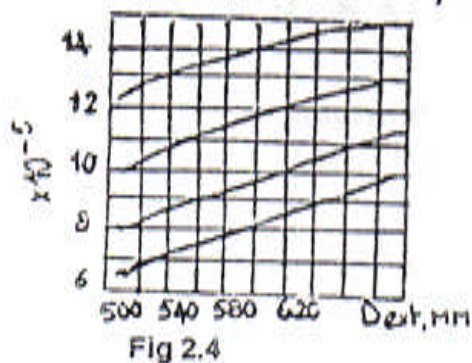
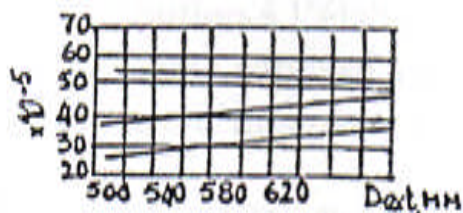


Fig 2.3



## Références bibliographiques

- 1) **PHILIPPE BARRET**. Machines électriques, théorie et mise en œuvre, Ellipses 2<sup>e</sup> édition Marketing S.A, 1967.
- 2) **REAL –PAUL BOUCHARD, GUY OLIVER**. Conception de moteurs asynchrones triphasés, édition de l'école polytechnique de Montréal, 1997.
- 3) **I.P.KOPILOV**. Conception des machines électriques. Edition Energie, MOSCOU 1980.
- 4) **M.KOSTENCO, L.PIOTROVSKI**. Machines électriques, Tome II, Editions Mir 1979.
- 5) **ADNANI B, AMIMEUR HOCINE**. Etude et conception d'un moteur asynchrone à encoche profondes. Université de BEJAIA 2005.
- 6) **EPE – ELETRO – INDUSTRIE**. Moteur triphasés et monophasés à bases tensions. AZAZGA Edition décembre 2005.
- 7) **Y. BOUKHAROUA, R. BENKENIN**. Calcul d'une série de machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil assisté par ordinateur. Mémoire d'ingénieur. Université de BOUMERDES 1997.
- 8) **S. HABBAS, C. ABBASSEN**. Optimisation du rendement d'une machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Mémoire d'ingénieur. Université de Tizi-Ouzou 2004.
- 9) **KATSMAN M.M**. Calcul et construction des machines électrique. Edition Ecole Supérieure de MOSCOU.1984.
- 10). **ELEC2753-2009**-Université catholique de Louvain.