

### 3.1 Introduction

*Ce chapitre est consacré à calculer des grandeurs caractérisant le dimensionnement des dents et des encoches et le flux magnétique, pénétrant dans ces dernières. Notre calcul exige la détermination successive des paramètres, et la détermination de ces dernière exige certaines formules et caractéristiques prises lors de plusieurs expériences élaborées avec les moteurs répondant à un fonctionnement normal.*

### 3.2 Calcul des caractéristiques de la machine

#### 3.2.1 Facteur de puissance et rendement de la machine asynchrone

Le facteur de puissance et le rendement de la machine dépendant de la puissance de celle-ci, ils varient de 0.7 pour les petites machines à 0.95 pour les grandes machines.

Le rendement  $\eta$  et le facteur de puissance  $\cos \varphi$  sont tirés d'après des diagrammes tracés à partir des études statistiques faites sur un grand nombre de moteurs (Normes allemandes), [10].

Ou par l'expression suivante :

$$\eta = \frac{P_u}{\sqrt{3}U_1 I_1 \cos \varphi} \quad (3 - 1)$$

#### 3.2.2 La puissance apparente du moteur

La puissance apparente calculée est exprimée par :

$$P_s = \frac{K_c P_{nom}}{\eta_{nom} \cos \varphi_{nom}} [KVA] \quad (3 - 2)$$

$K_c$  : Désigne le facteur de chute de tension statorique déterminé à partir de la formule suivante en fonction du paires de pôles.

$$K_c = 0.98 - 0.5P10^{-3} \quad (3 - 3)$$

### 3.3 Calcul et choix des dimensions principales du stator

#### 3.3.1 Choix du diamètre extérieur

Le choix du diamètre extérieur est déterminé suivant le tableau (3.1) en fonction de la puissance normalisée pour différentes paires de pôles, [11].

$D_{ext}$ (mm)	H (mm)	Puissance nominal en (KW) en fonction de 2p			
		2		4	
116	71	0.75	1.1	0.75	
131	80	1.5	2.2	1.1	1.5
149	90	3		2.2	1.5
168	100	4	5.5	3	4
191	112	7.5		5.5	3
225	132	11		7.5	11
272	160	15	18.5	15	18.5
313	180	22	30	22	30
349	200				

**Tabl. 3.1** Diamètre extérieur en fonction de la puissance nominale et nombre de paires de pôles.

### 3.3.2 Calcule du diamètre intérieur du stator et longueur virtuelle de l'induit

La relation de la densité linière du courant au périphérique de l'induit, c'est-à-dire le nombre d'ampères-tours par un m phases est par :

$$A_i = \frac{2m_1 N_1 l_i}{\pi D} \quad (3-4)$$

La puissance apparente interne est :

$$P_s = \frac{A_i B_\sigma K_{\omega 1} 60 n_s D^2 l_i 10^3}{8.610^3} \quad (3-5)$$

$$\frac{P_s 10^{-3}}{D^2 l_i 60 n_s} = \frac{K_{\omega 1} B_\sigma A_i}{8.610^3} = C \quad (3-6)$$

C : est appelé facteur d'utilisation de la machine.

(3-6) est l'équation fondamentale pour le calcul des dimensions principales de la machine.

On procède a deux manières pour calcul du volume  $D^2 l_i$  :

- Soit on choisit un champ d'induction  $B_\delta$ , et une densité du courant linière  $A_i$ ;
- Ou bien on choisit un coefficient d'utilisation « C », tel que les valeurs de C,  $A_i$ ,  $B_\delta$  sont déterminées par des abaques en fonction de  $\tau_p$ , p.

Après du calcul de la valeur de  $D^2 l_i$  on peut calculer le diamètre D et la longueur  $l_i$  par l'utilisation de la relation suivante :

$$\frac{l_i}{\tau_p} = \lambda \quad (3-7)$$

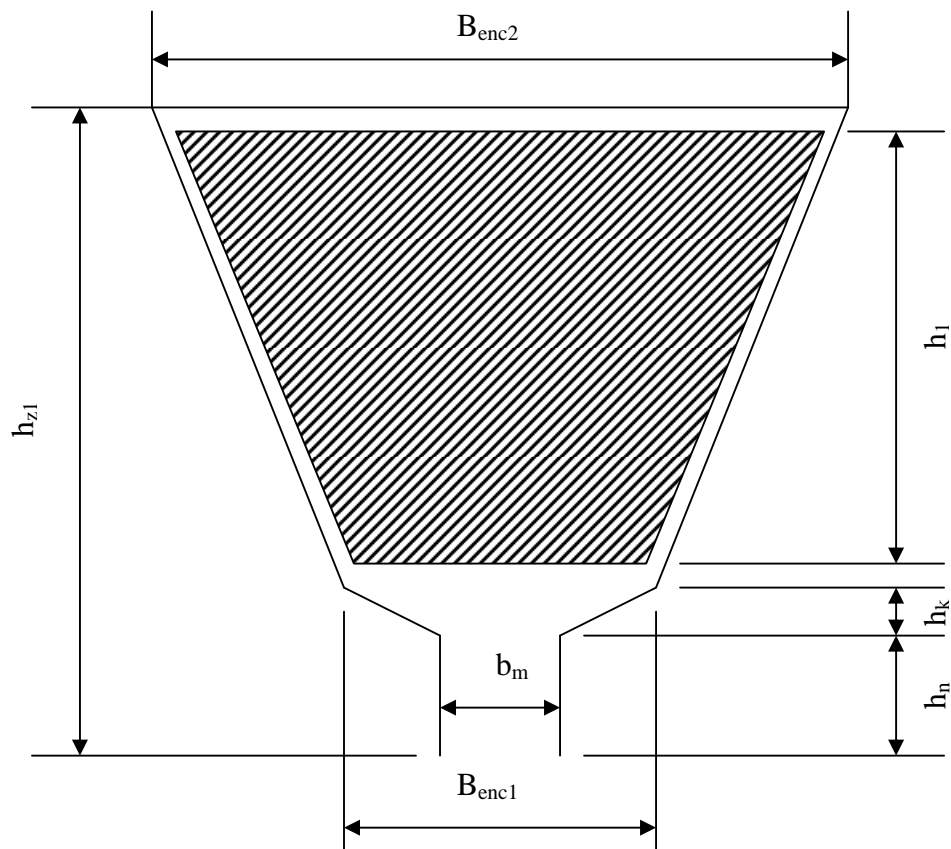
Le rapport  $\lambda$  est en fonction du nombre de paires de pôles, et avec un intervalle de variation pour le quel les caractéristiques de la machine reste inchangées, [12].

### 3.3.3 Identification de la forme des encoches statoriques

Pour identifier la forme des encoches statoriques, on se sert le tableau suivant, [11].

(volt)	2P	Forme de l'encoche
$\leq 380$	2, 4, 6	Trapézoïdale a demi fermée
$\leq 660$	2, 4, 6, 8	Trapézoïdale a demi fermée
$\leq 660$	2, 4, 6, 8	Rectangulaire a demi ouverte
$\leq 660$	2, 4, 6, 8	Rectangulaire a demi ouverte
$\leq 660$	10, 12	Trapézoïdale a demi fermée
$\leq 660$	10, 12	Rectangulaire a demi ouverte
$\leq 600$	4, 6, 8, 10, 12	Rectangulaire ouverte

**Tabl. 3.2** Forme de l'encoche en fonction de nombre de paire de pôles



**Figure. 3.2** Forme trapézoïdale de l'encoche

### 3.3.4 Nombre d'encoches par pôle et par phase

Il est donné par la formule suivante :

$$q_1 = \frac{Z_1}{2pm_1} \quad (3-8)$$

Avec :  $m_1=3$ ,

### 3.3.5 Le pas polaire

C'est la distance entre deux axes de pôle voisins de noms différents, il est donné par la formule suivante :

$$\tau = \frac{\pi D_1}{2p} \quad (3-9)$$

### 3.3.6 La charge linéaire

La densité linéaire du courant, c'est-à-dire le nombre d'ampères tours par mètre de périphérie d'induit et qui caractérise l'utilisation électrique de la machine. On peut tirer la densité linéaire du courant  $A_1$  à partir de la courbe  $A_1=f(D_{ext1})$ , [11].

### 3.3.7 Détermination du facteur d'enroulement statorique

Le facteur d'enroulement qu'on not  $K_{enr1}$  est donné par l'expression suivante :

$$K_{enr1}=K_r.K_d \quad (3-10)$$

Avec :

$K_d$  : Désigne le facteur de distribution.

$K_r$  : Désigne le facteur de raccourcissement.

On détermine la valeur de  $K_d$  à partir du tableau suivant, présenté en fonction du nombre d'encoches par pôle et par phase :

q1	2	3	4	5	6
$K_{d1}$	0.966	0.960	0.958	0.957	0.956
$K_{d2}$	0.707	0.767	0.653	0.646	0.642
$K_{d3}$	0.259	0.217	0.204	0.200	0.197
$K_{d4}$	0.259	0.179	0.157	0.152	0.145

**Tabl. 3.3** Nombre d'encoches par pôle et par phase

Pour le stator, on prévoit un enroulement à une seule couche, dont l'ouverture est égale au pas polaire ce qui donne un facteur de raccourcissement  $K_r=1$ , [11].

### 3.3.8 L'induction maximale dans l'entrefer

L'induction dans l'entrefer est une grandeur primordiale dans le dimensionnement de la machine, car c'est elle qui détermine la f.e.m, le couple et la puissance de la machine, [13].

$$B_\delta = \frac{6.11.10^{12} p}{\alpha_i k_f K_{enr1} N_s (D_1)^2 A_1 L_i} \quad (3-11)$$

Avec :

$\alpha_i$  : Coefficient de recouvrement polaire.

$K_f$  : Coefficient de forme de l'onde de l'induction dans l'entrefer.

Dans le cas du champ sinusoïdale :

$$\alpha_i = 2/3.14 \quad ; \quad K_f = 3.14/2\sqrt{2}$$

Le nombre totale de conducteur est donné par :

$$m1.N_{ph} \quad (3-12)$$

D'où le nombre de conducteur par encoche :

$$N1 = N_{ph} . m1 / Z1 \quad (3-13)$$

Le nombre de spire par phase est donné par l'expression suivante :

$$n = N1 . Z1 / 2m1 \quad (3-14)$$

### 3.4 Calcule des dimensions de la feuille statorique

#### 3.4.1 La largeur de la dent

Elle est donnée par la formule suivant :

$$b_{z1} = \frac{(t_1 B_\delta)}{K_{fer} B_{z1max}} \quad (3-15)$$

Avec :

$B_{z1max}$  : L'induction maximale dans la dent statorique. Elle est donnée par le tableau suivant en fonction de 2p.

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

h [mm]	2p	$B_{z1max}$ [tesla]		$B_{c1}$ [tesla]		$B_{z2max}$ [tesla]		$B_{c2}$ [tesla]	
50     132	2	1.75	1.95	1.50	1.65	1.75	1.95	1.35	1.45
	4	1.75	1.95	1.50	1.65	1.75	1.95	1.15	1.25
	6	1.75	1.95	1.45	1.60	1.75	1.95	1.05	1.15
160	2	1.75	2.00	1.45	1.70	1.75	1.95	1.35	1.45
	4	1.75	2.00	1.45	1.70	1.75	1.80	1.20	1.35
	6	1.70	1.85	1.35	1.50	1.75	1.90	1.05	1.15
180     225	2	1.70	1.90	1.45	1.65	1.95	1.95	1.35	1.45
	4	1.70	1.90	1.45	1.65	1.95	1.80	1.20	1.35
	6	1.70	1.90	1.45	1.65	1.95	1.90	1.05	1.15

**Tabl. 3.4** L'induction dans les dents rotoriques et statoriques et la culasse rotoriques et statoriques en fonction du nombre du paires du pôle.

### 3.4.2 La hauteur du dos du stator

Elle est donnée par la formule suivant :

$$h_{c1} = 0.5 * \alpha_i * \tau B_{\delta} / K_{fer} B_{c1} \quad (3-16)$$

### 3.4.3 La largeur minimale et maximale de l'encoche

Elle est donnée par les formules suivantes :

$$b_{enc1} = [\pi(D1 + 0.2h_{z1}) / Z1] - b_{z1} \quad : \text{La largeur minimale}$$

$$b_{enc2} = [\pi(D1 + 2h_{z1}) / Z1] - b_{z1} \quad : \text{La largeur maximale}$$

Avec :

$$h_{z1} = 0.5 (D_{ext} - D1) - h_{c1} \quad : \text{La hauteur de la dent statorique}$$

### 3.4.4 La hauteur de l'encoche

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$h_{enc1} = h_{z1} - (h_{k1} + h_{f1})$$

Avec :

$h_{f1}$  : Hauteur de la fente d'encoche statorique,  $h_{f1}$  varie (1.2 et 1.8) mm.

$$h_{k1} = 0.5 (b_{enc1} - b_m)$$

Avec :

$b_m$  : La largeur de la fente d'encoche donnée par le tableau suivant en fonction du nombre de paire de pôles.

<b>h [mm]</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>12</b>
<b>50_63</b>	<b>1.8</b>	<b>1.8</b>	<b>1.8</b>	<b>1.8</b>	-	-
<b>71</b>	<b>2.0</b>	<b>2.0</b>	<b>2.0</b>	<b>2.0</b>	-	-
<b>80_90</b>	<b>3.0</b>	<b>3.0</b>	<b>2.7</b>	<b>2.7</b>	-	-
<b>100_112</b>	<b>3.5</b>	<b>3.5</b>	<b>3.0</b>	<b>3.0</b>	-	-
<b>132</b>	<b>4.0</b>	<b>3.5</b>	<b>3.5</b>	<b>3.5</b>	-	-
<b>160_150</b>	<b>4.0</b>	<b>3.7</b>	<b>3.7</b>	<b>3.7</b>	-	-
<b>280_315</b>	-	-	-	-	<b>4.0</b>	<b>4.0</b>

**Tabl. 3.5** La largeur de la fente d'encoche en fonction du nombre de paire de pôles, ( $b_m$  pour 2p).

### 3. 4. 5 choix de l'entrefer

L'entrefer dans la machine présente la réluctance principale dans le circuit magnétique de la machine qui s'oppose au flux magnétique, c'est-à-dire à peu près 80% de la chute de tension magnétique a lieu au niveau de l'entrefer.

Pour limiter le courant absorbé par la machine pendant le fonctionnement à vide on choisit très étroit. On détermine l'épaisseur de l'entrefer en utilisant la courbe qui donne la variation de l'épaisseur en fonction du diamètre extérieur et le nombre de paire de pôles.

### 3. 4. 6 Section effective d'un conducteur

Cette section est calculée par l'expression suivante :

$$D_{nul} = \sqrt{\frac{S_{enc1} K}{N_1}} \quad (3 - 17)$$

Avec :

$S_{enc1}$  : section de l'encoche statorique,

$K$  : Coefficient de remplissage est de l'ordre de :

- 0.5 pour fil nu ;
- 0.6 à 0.7 pour fil avec isolation, [14].

## 3.5 Calcul et choix des dimensions principales du rotor, [14].

### 1. Nombre d'encoches

Sur le diamètre extérieur du rotor, on compte un nombre d'encoches  $Z_2$  pour chaque type de la machine.

### 2. Diamètre du rotor

Il existe deux diamètres extérieur et intérieur,

### 4 Pas dentaire

$$t_2 = \frac{\pi D_2}{Z_2} \quad (3 - 18)$$

### 3. Nombre d'encoches par pôle et par phase

$$q_2 = \frac{Z_2}{2p m_2} \quad (3 - 19)$$



$p$  : Nombre de paires de pôles,  
 $m_2$  : Nombre de phase rotorique,

Le nombre d'encoche par pôles est donné par l'expression suivante :

$$q_2' = \frac{Z_2}{2p} \quad (3-20)$$

#### 4. Facteur de distribution

Il est donné par la formule suivante :

$$K_{d2} = \frac{\sin(\frac{\pi q_2'}{2})}{q_2' \sin(\frac{\pi}{2q_2'})} \quad (3-21)$$

#### 5. Facteur d'enroulement rotorique

$$K_{enr2} = K_{d2} \cdot K_r \quad (3-22)$$

#### 6. Nombre de spire en série par phase ( $n_2$ )

Le rapport de transformation entre le rotor et le stator :

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{m_2 K_{enr2} \cdot N_2}{m_1 \cdot K_{enr1} \cdot N_1} = m \quad (3-23)$$

#### 7. Nombre total des conducteurs

$$N_{tot} = 2 \cdot m_2 \cdot n_2 \quad (3-24)$$

On résulte un nombre de conducteur par encoche :

$$N_2 = N_{tot} / Z_2 \quad (3-25)$$

#### 8. Le pas polaire

$$\tau_{p2} = \frac{\pi D_2}{2p} \quad (3-26)$$

### 3.5.1 Paramètres rotorique

#### 3.5.1.1. La résistance active d'une phase

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_r = \rho_{cu} \cdot L_{tot2} \cdot \frac{10^3}{S_{eff2}} \quad (3-28)$$

Avec :

$L_{tot2}$  : La longueur totale de l'enroulement rotorique d'une phase.

$$L_{tot2} = 2 \cdot n_2 \cdot L_{moy2} \quad (3-29)$$

$L_{moy2}$  : La longueur moyenne d'une demi-spire.

$$L_{moy2} = L_i + L_{f2} \quad (3-30)$$

$L_{f2}$  : La longueur moyenne de la partie frontale de l'enroulement rotorique.

$$L_{f2} = (1.16 + 0.14 \cdot p) \cdot b_{2moy}$$

$b_{2moy}$  : La longueur moyenne de la partie frontale de l'enroulement rotorique frontale entre les encoches d'extrémité.

$$b_{2moy} = \frac{Y_{2moy} \cdot \pi (D_1 + h_{z2})}{Z_2} \quad (3-31)$$

Avec :

$$Y_{2moy} = \frac{Z_2}{2p} \quad (3-32)$$

$$h_{z2} = 0.5(D_{ext2} - D_2) - h_{c2} \quad (3-33)$$

$h_{c2}$  : La hauteur du dos rotorique.

Il est donné par l'expression suivante :

$$h_{c2} = 0.5 \cdot (\alpha_i \cdot \tau_{p2} \cdot \frac{B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{c2}}) \quad (3-34)$$

La section standard choisie d'un conducteur est :

$$S_{eff2} = \pi \cdot \left( \frac{D_{nu2}}{2} \right)^2 \quad (3-35)$$

Avec :

$D_{nu2}$  : section effective d'un conducteur.

Cette section est calculée par l'expression suivante :

$$D_{nu2} = \sqrt{\frac{S_{enc2} \cdot K}{n_2}} \quad (3 -36)$$

Avec :

$S_{enc2}$  : section de l'encoche rotorique.

$K=0.5$  (pour fil nu)

$S_{enc2}=0.5 \cdot (b_{enc1} + b_{enc2}) \cdot h_{enc2} - S_{iso2}$

$b_{enc1}$  : La largeur minimale.

$$b_{enc1} = \frac{\pi \cdot (D_2 + 0.2 \cdot h_{z2})}{Z_2} - b_{z2} \quad (3 -37)$$

$$b_{z2} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{z2 \max}} \quad (3 -38)$$

$S_{iso2}$  : section occupée par l'isolation.

Elle est donnée par l'expression :

$$S_{iso2} = e_1(b_{enc1} + 2 \cdot h_{enc2}) + e_2 \left( \frac{b_{enc2} + b_{enc1}}{2} \right) + e_3 \cdot b_{enc1} \quad (3 -39)$$

Avec :

$e_1$  : Revêtement de l'encoche.

$e_2$  : Fermeture de l'encoche.

$e_3$  : Cale du milieu.

$h_{enc2}$  : La hauteur de la fonte d'encoche rotorique.

### 3. 5. 1.2 La réactance de fuite totale de l'enroulement

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$x_2 = \left[ \frac{0.158 \cdot 10^{-7} \cdot f \cdot L_1 \cdot N_{2tot}^2}{p \cdot q_2} \right] \sum \lambda_2 \quad (3 -40)$$

Avec :

$\sum \lambda_2$  : Perméase de dispersion de l'enroulement rotorique.

$$\sum \lambda_2 := \lambda_{enc2} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f}$$

### 3.5.1.3 Perméance d'encoche rotorique

$$\lambda_{enc2} = \frac{h_{enc} \cdot K_B}{3 \cdot b_{enc1}} + \left[ \frac{h_{f2}}{b_m} + \frac{3 \cdot h_{k2}}{b_{enc1} + 2 \cdot b_m} + \frac{h_{f2}}{b_{enc1}} \right] \cdot K_B' \quad (3-41)$$

Pour l'angle de raccourcissement :

$$\beta = 1$$

### 3.5.1.4 Perméance différentielle rotorique

La perméance différentielle est donnée par la formule suivante :

$$\lambda_{2d} = \left[ 0.9 \cdot t_2 \cdot \frac{(q_2 \cdot K_{ene1})^2}{K_\delta \cdot \delta} \right] \cdot K_{rr2} \cdot K_{dd2} \cdot K_{f2} \quad (3-42)$$

$$K_{f2} = 1 - \frac{0.033 \cdot b_{m2}^2}{\delta \cdot t_2} \quad (3-43)$$

$K_{rr2}$  : Coefficient donné par le tableau 3 1 en fonction de  $q_2$  ;

$K_{dd2}$  : Coefficient de fuite différentiel donné par le tableau (3 2) en fonction de  $Z_2/p$  et  $q_2$  ;

$K_\delta$  : Coefficient de Carter, il est donné par la relation suivante :

$$K_\delta = K_{\delta1} + K_{\delta2}$$

$$K_\delta = t_1 - \left[ t_1 - \frac{\left[ \frac{\delta_1}{\delta} \right]^2}{5 + \frac{\delta_1}{\delta}} \cdot \delta \right]^{-1} \quad (3-44)$$

Et

$$K_{\delta2} = t_2 \cdot \left[ t_2 - \frac{\left[ \frac{\delta_2}{\delta} \right]^2}{5 + \frac{\delta_2}{\delta}} \cdot \delta \right]^{-1} \quad (3-45)$$

### 3.5.1.5 Perméance frontale rotorique

Elle est donnée par la relation :

$$\lambda_{2f} = \frac{0.34.q_2.(L_{f2} - 0.64.\beta.\tau_{p2})}{L_i} \quad (3-46)$$

### 3.5.2 Paramètres du circuit magnétique

$$X_m = K_E \frac{U_{nom}}{I_\mu} \quad (3-47)$$

Pour calculer le courant magnétique  $I_\mu$ , il faut calculer la chute de tension magnétique totale dans le circuit magnétique de la machine.

#### 3.5.2.1 Calcul de tension magnétique totale par paires de pôles dans le circuit magnétique de la machine

Elle est donnée par :

$$\sum F_i = 2(F_\delta + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2} \quad (3-48)$$

Les valeurs des intensités qui correspondent à la différence induction dans les dents statoriques et rotoriques et culasse statoriques et rotoriques données par le tableau (3. 6).

Induction $B_z, B_c$ dans les dents et culasse	L'induction de champ magnétique Correspondant
$0.4 \leq B_z \leq 0.63$	$H_z = \exp(2.0545.B_z + 4.0039)$
$0.63 \leq B_z \leq 1.35$	$H_z = \exp((B_z + 3.314)/0.7435)$
$1.35 \leq B_z \leq 1.63$	$H_z = \exp((B_z + 0.0635)/0.5429)$
$1.63 \leq B_z \leq 1.95$	$H_z = \exp((B_z + 0.60186)/0.3273)$
$1.95 \leq B_z \leq 2.3$	$H_z = \exp((B_z - 0.3257)/0.2062)$
$0.7 \leq B_c \leq 1.0$	$H_c = \exp((B_c + 1.490809)/0.47733)$
$1.0 \leq B_c \leq 1.45$	$H_c = \exp((B_c + 1.5975)/0.496)$
$1.45 \leq B_c \leq 1.58$	$H_c = \exp((B_c + 0.304)/0.28826)$
$1.58 \leq B_c \leq 1.75$	$H_c = \exp((B_c + 0.0965)/0.02275)$
$1.75 \leq B_c \leq 1.95$	$H_c = \exp((B_c + 0.42226)/0.18034)$
$1.95 \leq B_c \leq 2.04$	$H_c = \exp((4.3518B_c - 0.0343))$

**Tabl. 3.6** Les intensités des champs magnétiques en fonction des inductions, [14].

### 3.6 Circuit magnétique

Le calcul du circuit magnétique constitue une partie importante dans la construction des machines électriques. La loi de circulation du champ dans le circuit magnétique constitue la base fondamentale pour ce calcul, soit :

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum F(At) \quad (3-49)$$

Qui s'énonce comme suit :

La différence de potentiel magnétique le long d'une ligne fermée est égale à la somme des forces magnétomotrices (F.M.M), [3, 6].

Pour  $N$  spires par phase parcourues par un même courant  $I$ , on a :

$$F = N.I \quad (3-50)$$

Pour simplifier les calculs dans les machines électriques on décompose l'intégrale en une somme de produits :

$$\oint \vec{H}_i \cdot d\vec{l}_i = \sum_{i=1}^n H_i.l_i = F(At) \quad (3-51)$$

Tel que dans un circuit  $i$  considéré la valeur du champ magnétique  $H_i$  est constante. On peut alors écrire :

$$H_1.l_1 + H_2.l_2 + \dots + H_n.l_n = F = N.I \quad (3-52)$$

$H$  : EST exprimé en A/m ;

$l$  : En mètre (m), [10].

#### 3.6.1 Calcul de la F.M.M

Le calcul de la f. m. m s'effectue de la manière suivante :

Connaissant la valeur de  $B_\delta$  et les dimensions du moteur on calcule le flux  $\phi$  par pôle, on peut déterminer aisément les valeurs de l'induction  $B_i$  et du champ magnétique  $H_i$  dans chaque tronçon par conservation du flux :

$$B_i = \frac{\phi_i}{S_i} \quad , \quad H_i = \frac{B_i}{\mu_i} \quad , \quad \mu_i = \mu_0 \mu_{ri}$$

$\mu_0$  : Perméabilité magnétique de l'air.

Le choix des tôles se fait suivant des critères économiques et selon leur qualité électromagnétique. La courbe d'aimantation de ce matériau  $B = f(H)$  nous permet de déterminer les valeurs du champ magnétique relatif à chaque tronçon.

Ces valeurs du champ  $H_i$  multipliées par  $l_i$ , longueur du tronçon, nous donne la valeur de la tension magnétique pour chaque tronçon :

$$H_i \cdot l_i = F_i \quad \text{En (A)} \quad (3-53)$$

On aura :

$$\sum_{i=1}^n H_i \cdot l_i = F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n = F = N \cdot I \quad (3-54)$$

### 3.6.2 Calcul des Chutes de potentiels magnétiques partiels

#### 3.6.2.1 F.M.M dans l'entrefer

L'entrefer constitue le premier pas de calcul de la F.M.M, puisque l'on prend pour base de calcul l'induction  $B_\delta$  ou le flux  $\phi_\delta$  dans celui-ci, et le fait que la chute de potentiel dans l'entrefer est le plus important dans la machine.

La chute de potentiel magnétique dans l'entrefer est proportionnelle au champ magnétique  $H_\delta$  et à l'épaisseur de l'entrefer  $\delta$  :

$$F_\delta = H_\delta \cdot \delta = \delta \cdot \frac{B_\delta}{\mu_0} \quad (At) \quad (3-55)$$

On note que  $S_\delta$  la surface virtuelle traversée par le flux et que cette dernière est proportionnelle à la longueur virtuelle  $l_i$  et à l'arc polaire virtuel  $b_i$ .

$$S_\delta = b_i \cdot l_i \quad (3-56)$$

La détermination de la valeur de  $S_\delta$  présentes quelques difficultés du fait des interruptions du fer que produisent les encoches le long de l'entrefer. Les canaux radiaux de ventilation et les

intervalles entre les pôles ainsi que de l'influence exercée par la saturation des dents sur la répartition de l'induction dans l'entrefer. Dans la relation :

$b_i$  Arc polaire virtuel représentant une fraction du pas polaire  $\tau_p$  ; la valeur de  $b_i$  dépend de la forme des pôles et de la saturation du fer, donc de la forme de la courbe d'induction.

$$b_i = \alpha_i \cdot \tau_p \quad (3-57)$$

$\alpha_i$  Est appelé coefficient d'aplatissement de la courbe.

$$\alpha_i = \frac{B_{\delta eff}}{B_{\delta max}} < 1$$

Pour la forme sinusoïdale  $\alpha_i = \frac{2}{\pi}$ , mais dans le cas général la courbe d'induction n'est pas sinusoïdale du fait de la saturation dans le fer. L'augmentation de la saturation engendre une augmentation de coefficient d'aplatissement  $\alpha_i$  qui devient supérieur à  $\frac{2}{\pi}$ .

### 3.6.2.2 Chute de potentiel magnétique dans les dents

Lorsque la saturation dans les dents n'est pas forte on peut admettre qu'avec suffisamment d'exactitude, tout le flux correspondant à un pas dentaire passe par la dent.

Dans le cas général de calcul des machines électriques, on n'a pas intérêt d'avoir une saturation très forte qui augmenterait le courant à vide et provoquerait un échauffement exagéré de la machine, on a intérêt à avoir  $B_{zy} < 1.8T$ . On supposerait dans ces conditions

que tout le flux passe par la dent, pour calculer le champ magnétique dans cette dernière, on doit la diviser en plusieurs sections, déterminer le champ dans chaque section et faire la somme des chutes de potentiels magnétiques :

$$F_z = \int_0^h H_{zy} \cdot dl_z \quad (3-58)$$

Cependant dans la pratique, on utilise la règle de **Simpson** qui donne des résultats meilleurs. Sachant qu'on subdivise la dent en trois parties, l'intensité moyenne du champ est calculée comme suit ;



$$H_{z.moy} = \frac{1}{6} (H_{z.min} + 4 \cdot H_{z.med} + H_{z.max}) \quad (3-59)$$

$H_{z.min}$  : La valeur du champ minimum dans la dent;

$H_{z.med}$  : La valeur du champ médian;

$H_{z.max}$  : La valeur du champ maximum.

La valeur de la chute de potentiel magnétique dans la dent est :

$$F_z = h_z \cdot H_{z.moy} \quad (3-60)$$

Ce résultat est valable aussi bien pour le rotor que pour le stator. On refait les mêmes calculs pour les deux parties tout en considérant les caractéristiques de chacune d'elles.

### 3.6.2.3 Coefficient de saturation

Supposons que l'on a tracé la courbe d'induction en fonction de la FMM ( $B = f(F)$ ) pour différentes valeurs de  $B_\delta$ .

$F$  Etant la F.M.M nécessaire pour l'excitation de la machine.

On remarque que pour des petites valeurs de  $B_\delta$  la chute de tension magnétomotrice dans l'entrefer est prédominante, mais dès que  $B_\delta$  dépasse une certaine valeur, la chute de tension dans les dents augmente; le rapport de la somme des chutes de tensions FMMt : dans l'entrefer et les dents à la tension  $F_\delta$  augmente.

Ce rapport est appelé coefficient de saturation  $K_s$

$$K_s = \frac{F_\delta + F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} > 1$$

On remarque que la valeur de  $K_s$  dépend éventuellement de la chute de tension dans les dents statorique et rotorique  $F_{z1}$  et  $F_{z2}$ , donc de la saturation du fer dans celle-ci.

Le coefficient de saturation  $K_s$  à une grande influence sur les caractéristiques de la machine, puisque l'augmentation de  $K_s$  signifie une saturation dans les dents.

### 3.6.2.4 Coefficient de forme de la courbe d'induction

Par définition le coefficient de forme  $K_f$  représente le rapport de la valeur efficace de l'induction dans l'entrefer  $B_{\delta\text{eff}}$  à la valeur moyenne de l'induction dans l'entrefer  $B_{\delta}$ ,  $K_f \geq 1$ . Le coefficient  $K_f$  augmente quand la saturation diminue, celui-ci intervient dans le calcul de la FEM, le coefficient d'aplatissement et le coefficient de forme respectivement  $\alpha_i$  et  $K_f$  étant fonction de coefficient de saturation  $K_s$ , sont données par une courbe [Annexe]. Ces courbes ont été établies à partir d'études statistiques faites sur un grand nombre de machines asynchrones, [15].

### 3.6.2.5 Facteur de carter (correction de l'entrefer)

Dans le paragraphe précédent on a pas tenu compte de la présence d'encoche pour calculer le pas polaire virtuel  $b_i$ ; cette dernière est prise en compte en remplaçant l'entrefer  $\delta$  par un

entrefer fictif  $\delta^*$  tel que  $\frac{\delta}{\delta^*} = K_c > 1$ .

$K_c$  Est appelé facteur de carter.

En pratique on prend :  $\gamma = \frac{\left(\frac{s}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{s}{\delta}}$

$s$  : Ouverture de l'encoche ;

$\tau_z$  : Pas dentaire ;

$\delta$  : Entrefer.

$$F_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \cdot K_c \cdot \delta = \frac{\phi_{\delta}}{S_{\delta} \cdot \mu_0} \cdot K_c \cdot \delta \quad (3-61)$$

### 3.6.3 Calcul du nombre de spires $n_1$ par phase du primaire

La relation entre la F.E.M induite par phase  $E$  et le flux  $\phi$  dans le cas d'une induction sinusoïdale est

$$E = 4 \cdot K_f \cdot f_1 \cdot n_1 \cdot K_{w1} \phi \quad (3-62)$$

Le facteur de saturation  $K_s$  pour les machines asynchrones est pris en première approximation entre 1,1 et 1,4.

On peut écrire pour une phase du primaire

$$N_1 = \frac{E_1}{4 \cdot K_f \cdot f_1 \cdot K_{w1} \cdot \phi} \quad (3-63)$$

La F.C.E.M induite  $E_1$  par phase est toujours inférieure à la tension  $V$  aux bornes de la machine

$$E_1 = V_1 \cdot \frac{1}{1 + \sigma_{H1}} \quad (3-64)$$

$$\frac{1}{1 + \sigma_{H1}}$$

Désigne le coefficient de dispersion de Heyland du primaire.

D'où l'on peut écrire :

$$N_1 = \frac{V_1 \cdot \left( \frac{1}{1 + \sigma_{H1}} \right)}{4 \cdot K_f \cdot f_1 \cdot K_{w1} \cdot \phi} \quad (3-65)$$

Le coefficient  $\sigma_{H1}$  est obtenu à partir d'un diagramme, [Annexe].

On remarque sur ce diagramme que l'augmentation du nombre de paire de pôles engendre une augmentation de dispersion, [15].

### 3.6.4 Correction de l'induction dans les dents et la culasse du stator

Ayant déterminé un coefficient de dispersion  $\sigma_{H1}$  par diagramme, ce qui correspond à une réactance de fuite du primaire  $X_{\sigma 1}$ , le flux correspondant à cette réactance de fuite  $\phi_{\sigma 1}$  passe partiellement par la culasse et les dents du stator. Donc les inductions magnétiques doivent être augmentées d'une quantité proportionnelle au flux de fuite dans le calcul de la chute de tension magnétique.

Dans le calcul, on prend avec une approximation suffisante:

$\phi (1 + \sigma_{H1})$  : Flux dans la culasse et au pied de la dent ;

$\phi \left( 1 + \frac{2}{3} \sigma_{H1} \right)$  : Flux à la mi-hauteur de la dent ;

$\phi \left( 1 + \frac{1}{3} \sigma_{H1} \right)$  : Flux à la tête de la dent.

Les valeurs des inductions corrigées dans chaque partie de la machine avec l'induction dans l'entrefer:  $\phi_\delta$  sont :

$$B_\delta = \frac{\phi_\delta}{\alpha_i \tau_p l_i} \quad (3-66)$$

### 3.6.4.1 Pour l'induction dans le stator

$$B_{z1p} = \frac{l_i}{K_{fe} \cdot L_{fe}} \cdot \frac{\tau_{z1}}{Z_{1p}} \cdot B_\delta \left( 1 + \sigma_{H1} \right) \quad (3-67)$$

$B_{z1p}$  : Induction au pied de la dent ;

$\tau_{z1}$  : Pas dentaire statorique ;

$Z_{1p}$  : Largeur de la dent au pied de celle-ci.

$$B_{z1m} = \frac{l_i}{K_{fe} \cdot L_{fe}} \cdot \frac{\tau_{z1}}{Z_{1m}} \cdot B_\delta \left( 1 + \frac{2}{3} \sigma_{H1} \right) \quad (3-68)$$

$B_{z1m}$  : Induction à mi- hauteur de la dent ;

$Z_{1m}$  : Largeur de la dent à mi-hauteur de celle-ci.

$$B_{z1t} = \frac{l_i}{K_{fe} \cdot L_{fe}} \cdot \frac{\tau_{z1}}{Z_{1t}} \cdot B_\delta \left( 1 + \frac{1}{3} \sigma_{H1} \right) \quad (3-69)$$

$B_{z1t}$  : Induction à la tête de la dent ;

$Z_{1t}$  : Largeur de la dent à la tête de celle-ci ;

$$B_{jl} = \frac{\phi_\delta}{2 \cdot K_{fe} \cdot L_{fe} \cdot h_{jl}} \cdot \left( 1 + \sigma_{H1} \right) \quad (3-70)$$

$B_{jl}$  : Induction dans la culasse du stator, [15].

### 3.6.5 Pour l'induction dans le rotor

$$B_{z2p} = \frac{l_i}{K_{fe} \cdot L_{fe}} \cdot \frac{\tau_{z2}}{Z_{2p}} \cdot B_{\delta} \quad (3-71)$$

$$B_{z2m} = \frac{l_i}{K_{fe} \cdot L_{fe}} \cdot \frac{\tau_{z2}}{Z_{2m}} \cdot B_{\delta} \quad (3-72)$$

$$B_{z2t} = \frac{l_i}{K_{fe} \cdot L_{fe}} \cdot \frac{\tau_{z2}}{Z_{2t}} \cdot B_{\delta} \quad (3-73)$$

$$B_{j2} = \frac{\phi}{2 \cdot K_{fe} \cdot L_{fe} \cdot h_{j2}} \quad (3-74)$$

### 3.6.7 Calcul de la F.M.M dans l'entrefer

Après le calcul des inductions, on déduit les valeurs des champs magnétiques relatifs à chaque tronçon, ce qui nous permet de calculer les chutes de potentiel magnétique :

$$2F_{\delta} = 2 \cdot K_c \cdot \delta \cdot \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \quad (3-75)$$

$$2F_{z1} = 2 \cdot H_{z1} \cdot h_{z1} \quad (3-76)$$

$$2F_{z2} = 2 \cdot H_{z2} \cdot h_{z2} \quad (3-77)$$

$$F_{j1} = H_{j1} \cdot l_{j1} \quad (3-78)$$

$$F_{j2} = H_{j2} \cdot l_{j2} \quad (3-79)$$

On remarque que les dents rotoriques et statoriques sont parcourues deux fois.

Avant de déterminer la chute de potentiel dans les culasses, il faut calculer la valeur de  $K_s$ , et la comparer avec la valeur de  $K_s$  celle choisi au préalable. Si ces valeurs sont différentes, on prend la valeur intermédiaire moyenne et on refait les calculs jusqu'à l'égalité des deux valeurs, ce qui permet d'avoir les trois coefficients:

$K_s, K_f$  Et  $\alpha_1$ , coefficients qui seront utilisés par la suite dans nos calculs, [15].

### 3.7 Courant magnétisant

L'équation (3-80) permet de calculer le courant magnétisant

$$I_m = \frac{p \cdot F_{tot}}{0.9 \cdot m_1 N_1 K_{w1}} \quad (3-80)$$

### 3.8 Courant de barre et anneau de court-circuitage

La tension induite dans une barre rotorique est égale à la F.E.M du primaire rapportée au secondaire:

$$E_2 = \frac{V_1}{1 + \sigma_{H1}} \cdot \frac{N_2 \cdot K_{w2}}{N_1 \cdot K_{w1}} \quad (3-81)$$

Finalement le courant  $I_2$  est calculé à partir de la puissance mécanique:

$$P_{mec} = P_u + P_{ft+vt} + P_{sup} \quad (3-82)$$

$P_u$  Puissance utile à l'arbre ;

$P_{ft+vt}$  Pertes par frottement et ventilation ;

$P_{sup}$  Pertes superficielles et par pulsation du flux dans la dent.

Si l'on suppose ces pertes à vide et en charge égales, on peut écrire :

$$m_2 I_2 E_2 (1 - g) = P_{mec} = P_u + P_{ft+vt} + P_{sup}$$

D'où on déduit  $I_2$  :

$$I_2 = \frac{P_u + P_{ft+vt} + P_{sup}}{m_2 I_2 E_2 (1 - g)} \quad (3-83)$$

$g$  Etant le glissement estimé ;

$m_2$  Nombre de phase du secondaire.

Ainsi le courant d'anneau est :

$$I_{an} = \frac{I_2}{2 \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2}} \quad (3-84)$$

### 3.9 Les pertes

Nous avons dans " le chapitre une ", les pertes dans une machine divisées en quatre parties :

- ✓ Les pertes par effet Joule ou pertes en cuivre.
- ✓ Les pertes par Hystérésis, courants de Foucault et pulsation du flux (pertes dans le fer).
- ✓ Les pertes par frottement et ventilation, qui sont très petites par rapport aux autres pertes.
- ✓ Les pertes supplémentaires en cuivre et dans les parties constructives de la machine, généralement sont estimées à 0,5% de la puissance nominale (normes allemandes), [15].

#### 3.9.1 Pertes en cuivre

Dans un enroulement de résistance  $R$  les pertes joule simples de cuivre produit par un courant  $I$  sont égale à:

$$p_j = R.I^2 \quad (3-85)$$

##### 3.9.1.1 Pertes en cuivre dans le stator

Le calcul de la résistance statorique est généralement rapporté à la température 75°C.

Les pertes par effet Joule dans les enroulements du stator sont :

$$P_{j1} = m_1 R_1 I_1^2 \quad (3-86)$$

$R_1$  Représente la résistance statorique par phase.

$I_1$  Courant de phase.

$m_1$  Nombre de phases.

Pour le calcul de la résistance statorique  $R_1$  pour une phase on utilise la formule suivante:

$$R_1 = \rho \cdot \frac{L_{tot}}{S} = 2 \cdot N_n \cdot l_{c0} \cdot \frac{\rho}{S} \quad (3-87)$$

$$S = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad (3-88)$$

$S$  La section des conducteurs utilisant dans l'enroulement.

$\rho$  La résistivité de cuivre, elle est dépend de la température de cuivre.

$l_{c0}$  La longueur de conducteur.

$N_n$  Nombre du conducteur par phase.

La longueur totale de l'enroulement pour une phase est :

$$L_{tot} = 2.N_n.I_{CO} \quad (3-89)$$

$L_{tot}$  La longueur total d'enroulement pour une phase.

La longueur du conducteur est:

$$L_{CO} = l_a + 1,3\tau_p \left( \frac{C'}{\tau_p} \right) + 5cm \quad (3-90)$$

### 3.9.1.2 Perte en cuivre dans le rotor

Les pertes dans le cuivre pour le secondaire sont:

$$P_{CU2} = m_2 R_2 . I_{2bar}^2 = m_2 R_2' I_2'^2 \quad (3-91)$$

$R_2$  La résistance totale d'une phase du secondaire (résistance d'une barre).

$R_2'$  La résistance totale d'une phase du secondaire ramenée au primaire.

$I_2'$  Courant de barre ramenée au primaire.

$$R_{bar} = \frac{\rho L_{bar}}{S_{bar}} \quad (3-92)$$

$L_{bar}$  La longueur d'une barre avec une inclinaison égale au pas dentaire statorique  $\tau_{z1}$ , et un dépassement de chaque coté.

$$L_{bar} = \frac{\tau_{z1}}{\sin \alpha} + h \quad (3-93)$$

$h$  Le dépassement.

$$\tan g \alpha = \frac{\tau_{z1}}{L_a}, \alpha = \arctg \frac{\tau_{z1}}{L_a} \quad (3-94)$$

La résistance de l'anneau:

$$R_{an} = \rho \frac{L_{an}}{S_{an}} \quad (3-95)$$

La longueur de l'anneau est prise d'une manière approximation:

$$L_{an} = (\tau_p) - \left( \frac{d_b}{2} \right) \quad (3-96)$$

$d_b$  Diamètre de la barre.



### 3.9.2 Pertes fer

Les pertes dans le fer se composent principalement de pertes Hystérésis et perte par courants de Foucault.

#### 3.9.2.1 pertes d'Hystérésis

On peut déterminer les pertes par hystérésis par l'expression :

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_m^2 \quad (3-97)$$

Avec :

$K_h$  Coefficient de pertes par hystérésis

#### 3.9.2.2 Pertes par courant de Foucault

On peut exprimer les pertes par courant de Foucault par la relation :

$$P_w = \sigma_w (S_t f \hat{B})^2 10^{-2} \quad (W/Kg) \quad (3-98)$$

$S_t$  Désigne l'épaisseur de la tôle du fer.

$f$  Fréquence des courant.

$\sigma_w$  Constant de fer.

Enfin les pertes dans le fer (Les pertes Hystérésis et de Foucault) sont transformés en chaleur.

La somme des pertes par seconde dans un Kg de fer:

$$P_{h+w} = \sigma_H f \hat{B}^2 10^{-2} + \sigma_w (S_t f \hat{B})^2 10^{-2} \quad (W/Kg) \quad (3-99)$$

Les constants  $\sigma_H$  ,  $\sigma_w$  pour les différents matériaux sont donnés.

#### 3.9.2.3 Pertes dans la culasse statorique

##### a- Les pertes Hystérésis dans la culasse statorique

On prend par considération l'influence de la répartition du champ dans la culasse en multiplie la formule (3-99) par un coefficient  $K_{hj}$ , ce coefficient est donné par un diagramme en fonction de  $D/D_e$ , pour différentes paires de pôle.

$$P_{hj} = \sigma_H f \hat{B}^2 m_j K_{hj} 10^{-2} \quad (3-100)$$

Les pertes sont d'autant plus grandes que ce coefficient est grand.

- $D$  Diamètre à l'alésage.  
 $D_e$  Diamètre extérieur de la culasse  
 $m_j$  La masse de la culasse.

### b- Les pertes par courants de Foucault dans la culasse statorique

Sur les mêmes considérations pour les pertes par courants de Foucault, la formule générale doit être multiplié par un coefficient  $K_{wj}$  pour tenir compte de la répartition du champ dans la culasse.

$$P_{wj} = \sigma_w (S_t f \hat{B}_j) m_j K_{wj} 10^2 \quad (3-101)$$

Les pertes totales par Hystérésis et par courants de Foucault dans la culasse statorique sont:

$$P_{(h+w)j} = (K_{hj} \sigma_h f 10^{-2} + K_{wj} \sigma_w (S_t f)^2 10^2) \hat{B}_j^2 m_j \quad (3-102)$$

$$m_j = \gamma K_{fe} L_{fe} \left( \left( \frac{D_e}{2} \right)^2 - \left( \frac{D}{2} + h_{z1} \right)^2 \right) \pi \quad (3-103)$$

$$D_e = D + 2h_{j1} + 2h_{z1} \quad (3-104)$$

- $\gamma$  Densité volumique des tôles des fers.  
 $h_{z1}$  Profondeur de la dent statorique.  
 $h_{j1}$  Epaisseur de la culasse.

### 3.9.2.4 Pertes dans les dents

#### a- Les pertes Hystérésis dans les dents

Les pertes d'Hystérésis dans les dents d'encoche statorique des machines électriques sont :

$$P_{hz} = \sigma_H f \hat{B}_z^2 m_z 10^{-2} \quad (3-105)$$

- $m_z$  Masse totale des dents.  
 $B_z$  Est prise comme la valeur moyenne de l'induction au pied, au milieu et à la tête de la dent

#### b- Les pertes par courant de Foucault dans les dents

$$P_{wz} = \sigma_w (S_t f \hat{B})^2 m_z 10^2 \quad (3-106)$$

$$m_z = M_{z1} Z_1 \quad (3-107)$$

$$M_{z1} = \gamma v \quad (3-108)$$

$\gamma$  Densité de la tôle de fer.

$Z_1$  Nombre d'encoche statorique.

$M_{z1}$  La masse d'une dent.

$v$  Volume du fer.

A titre d'exemple pour une encoche trapézoïdale :

$$v = (v_1 + v_2 + v_3) \quad (3-109)$$

$$v_1 = (\tau_{z1} - s)h_4 L_{fe} K_{fe} \quad (3-110)$$

$$v_2 = \frac{Z_{1m} + (\tau_{z1} - s)}{2} L_{fe} K_{fe} h_3 \quad (3-111)$$

$$v_3 = hZ_{1m} L_{fe} K_{fe} \quad (3-112)$$

Les pertes totales par Hystérésis et par courants de Foucault dans les dents sont:

$$P_{(h+w)_z} = (f \cdot \sigma_h \cdot 10^{-2} + (S_t \cdot f)^2 10^2 \sigma_w) \cdot \hat{B}_z^2 \cdot m_z \quad (3-113)$$

Une fois cette équation n'est valable que pour des inductions sinusoïdales dans les dents, pour tenir compte de l'effet des harmoniques supérieur, il suffit de modifier le chiffre des pertes en fonction de la fréquence et de prendre :

$$P_{(h+w)_z} = P_{fe}^- B_{zm} \quad (3-114)$$

### 3.10 Conclusion

Ce chapitre est consacré au calcul d'une machine asynchrone. Ce dernier est la base théorique nécessaire pour l'élaboration d'un programme de conception général. Il est noté que au cours de développement du programme, la connaissance de différentes parties de la machine devient nécessaire.