

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



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

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER ACADEMIQUE EN
ELECTROTECHNIQUE**

OPTION : MACHINES ELECTRIQUES

THEME :

**ETUDE DES PERTES ET LEUR REPARTITIONS
DANS UN MOTEUR ASYNCHRONE A CAGE DE 4kW**

Proposé par :

M^R : KHALDI RABAH

présenté par :

M^R : AMRIOUI GHILES

M^R : ABDICHE KARIM

PROMOTION : 2012/2013

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à la mémoire de mon père, à ma mère qui m'a apportée son soutien tout au long de mes années d'études, à mes frères et sœurs et à toute ma famille ainsi qu'à mes amis.

Amriouí Ghíles

Je dédie ce modeste travail à mes parents qui m'ont aidé à surmonter toutes les difficultés rencontrées tout au long de mon parcours scolaire et universitaire, ainsi qu'à mes frères, à tous les membres de la grande famille Abdiche, ainsi qu'à l'ensemble de mes enseignants de ma première scolarité à ce jour.

Recevez tous ma sincère gratitude.

Abdiche Karim

Remerciements

Nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidés à mener à bien ce modeste travail, en particulier l'encadreur de notre projet de fin d'études en l'occurrence monsieur R.KHALDI Maître assistant classe A à l'U.M.M.TO.

Ainsi qu'à tous les enseignants de l'université Mouloud Mammeri qui nous ont prodigué ce précieux savoir le long de notre cursus universitaire.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Différentes pertes dans un moteur à cage	
I.1 introduction	2
I.2 Constitution d'un moteur asynchrone triphasé à cage	2
I-2.1 Stator	3
I-3 Principe de fonctionnement	3
I-4 Bilan des puissances	4
I-4.1 Puissance électrique absorbée	5
I-4.2 Puissance transmise au rotor	6
I-5 Les différentes pertes	6
I-5.1 Pertes joules au stator	6
I-5.2 Pertes fer au stator	7
I-5.3 Pertes joules au rotor	8
I-5.6 Pertes supplémentaires	9
I-6 Conclusion	11
Chapitre II : Calcul des pertes par dimensionnement et circuit électrique équivalent	
II-1 Introduction	12
II-2 calcul des pertes par la méthode de dimensionnement	12
II-2.2 Pertes mécaniques	13
II-2.3 Pertes magnétiques	15
II-2.4 Pertes magnétiques supplémentaires d'acier	15
II-2.5 Pertes totales dans l'acier	16
II-2.8 Le rendement	17
II-3 Calcul des pertes par la méthode du circuit équivalent	17

II-3.3 Détermination de la résistance statorique	18
II-3.5 Détermination des pertes fer et des pertes mécaniques	19
II-3.6 Détermination de R_m et X_m	20
II-3.7 Essai à rotor bloqué	21
II-3.7.1 Expression de la résistance R_r'	22
II-4 Expression des caractéristiques du moteur asynchrone obtenu à partir du schéma Equivalent	23
II-4.2 Expression du courant primaire	24
II-4.6 Expression de la puissance absorbée	25
II-5 Conclusion	26

Chapitre III : Répartition des pertes dans les différentes parties d'un moteur asynchrone à cage

III.1 Introduction	27
III.2 Répartition des pertes de puissance dans la machine	27
III.2-1 Répartition des puissances dans le moteur à vide	27
III-3 Essai en charge nominale	28
III-3.1 A 100% de la puissance absorbée	28
III-4 Répartition des pertes joules dans l'enroulement statorique	29
III-5 Répartition des pertes joules dans l'enroulement rotorique	30
III-6 Répartition des pertes fer dans le circuit magnétique:	30
III-7 Répartition des pertes mécaniques	31
III-8 Conclusion	32

Chapitre IV : Mesure expérimentale des pertes d'un moteur asynchrone à cage

IV-1 Introduction	33
IV-2 Détermination des paramètres électriques	33
IV-2.1 Mesure de la résistance statorique	33
IV-2.2 Détermination de la résistance magnétisante et de la réactance magnétisante	34
IV 2.3 Détermination des réactances de fuite et de la résistance ramenée au rotor	35
IV-2.4 Essai en charge	37

IV-3 Courbe des puissances pratiques absorbée, transmise et utile en fonction du glissement	38
IV-4 Les courbes théoriques (schéma électrique équivalent) et pratique	38
IV-5 Interprétation des courbes	41
IV-6 Conclusion	41
Conclusion générale	42
Bibliographie	43
Annexe 1 Calcul des pertes en régime nominal par la méthode de dimensionnement	44
Annexe 2 Répartition des pertes dans les différentes parties du moteur	54
Annexe 3 Les abaques et dimensions	61

Introduction générale

Introduction générale

Le concept de la machine asynchrone d'induction à environ 120 ans, depuis, cette machine s'est imposé dans l'industrie. C'est le moteur le plus répandu à cause du faible cout de fabrication. La mise en œuvre de ce moteur est aisée. Sur le réseau alternatif monophasé, il a fallu cependant trouve quelques astuces de démarrage.

Le sujet de notre travail consiste à définir et calculer les différentes pertes ainsi que leurs répartitions dans un moteur asynchrone à cage de 4kW avec différentes méthodes :

La première méthode fait recours aux dimensions géométriques de la machine pour le calcul des pertes, elle est appelée méthode de dimensionnement. Ces dimensions sont fournies par le constructeur.

La deuxième méthode, exige d'identifier les paramètres électriques de la machine asynchrone en utilisant le schéma électrique équivalent simplifié en (T), puis calculer les pertes à l'aide de ces paramètres.

La troisième méthode se base sur les résultats expérimentaux effectués au laboratoire.

Le plan de notre travail est réparti ainsi :

Chapitre I : consacré à la description générale de la machine asynchrone, ainsi qu'à son principe de fonctionnement, son bilan de puissance, et différentes pertes et puissances dans cette dernière.

Chapitre II : comprend essentiellement le calcul des pertes en utilisant la méthode de calcul par dimensionnement, et le calcul des paramètres électriques du schéma équivalent en utilisant l'essai en courant continu, l'essai à vide et à rotor bloqué. Par la suite on calcul les pertes en utilisant ces paramètres.

Chapitre III : consiste en la répartition des pertes calculées dans différentes parties du moteur asynchrone à cage.

Chapitre IV : est consacré à la représentation des essais expérimentaux effectués au laboratoire TEC 423. Lesquels sont comparés aux deux méthodes présentées dans

le chapitre II.

Vers la fin on a clôturé notre travail avec une conclusion générale.

CHAPITRE I

DIFFERENTES PERTES DANS UN MOTEUR ASYNCHRONE A CAGE

I.1 introduction :

La transformation de l'énergie d'une forme à une autre au moyen d'une machine s'accompagne toujours d'une certaine perte de puissance.

Ces pertes se produisent dans la machine elle-même et donne lieu à :

- Echauffement des différentes parties de la machine.
- Diminution du rendement ; la puissance débitée par la machine étant inférieure à la puissance qui lui est fournie.

L'étude du phénomène des pertes de puissances est d'un grand intérêt, car elle nous révèle comment ces pertes peuvent être réduites. On peut répartir ces pertes en :

- Pertes électriques dans l'enroulement.
- Pertes magnétiques.
- Pertes mécaniques.
- Pertes supplémentaires.

Un moteur asynchrone triphasé comporte essentiellement deux parties principales : Un stator ou inducteur et un rotor ou induit séparés par un entrefer de faible épaisseur.

I.2 Constitution d'un moteur asynchrone triphasé à cage :

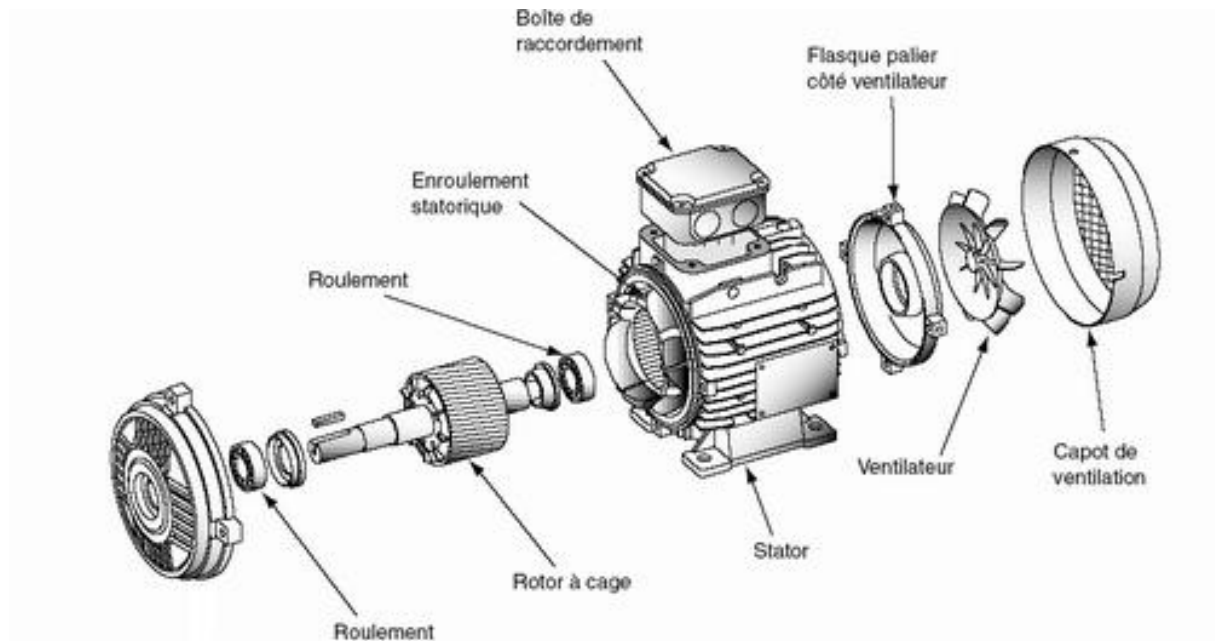


Figure (I-1): Schéma éclaté d'un moteur asynchrone à cage.

I-2.1 Stator :

C'est la partie fixe du moteur, la carcasse est en fonte ou en alliage léger renferme une couronne de tôles minces (de l'ordre de 0.5 mm d'épaisseur) en acier au silicium. Les tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par un vernis isolant. Le feuilletage du circuit magnétique réduit les pertes par cycle d'hystérésis et par courant de Foucault. Les tôles sont munies d'encoches sur lesquelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant. Chaque enroulement est constitué de plusieurs bobines. Le mode de couplage de ces bobines entre elles, définit le nombre de paires de pôles du moteur, donc la vitesse du champ tournant [3].

I-2.2 Rotor à cage d'écureuil :

C'est la partie mobile du moteur, il est constitué de tôles ferromagnétiques et de barres conductrices très souvent en aluminium avec des extrémités court-circuitées par deux couronnes également conductrices, sa résistance électrique est très faible [3].

I-3 Principe de fonctionnement :

En alimentant les trois bobines statoriques déphasées de 120° par un système alternatif triphasé équilibré, ceci permet de créer un champ magnétique tournant dans l'espace et dans le temps, il peut être considéré comme un champ constant qui tourne à la pulsation de synchronisme [4].

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \text{ [rd/s]} \quad \text{[I-1]}$$

La vitesse à laquelle tourne ce champ magnétique dans l'entrefer est dite :

Vitesse de synchronisme, elle est directement proportionnelle à la fréquence "f" du réseau et inversement proportionnelle au nombre de pair de pôles p [4].

$$N_s = \frac{60.f}{p} \text{ [Tr/min]} \quad \text{[I-2]}$$

Ce champ variable coupe les conducteurs rotoriques, et d'après la loi de

Faraday $e = \frac{d\phi}{dt}$ (Tout conducteur soumis à une variation du flux est un siège d'une f.e.m), et donc une force électromotrice apparaît, ce qui engendre des courants induits circulant dans les conducteurs rotoriques en court-circuit.

La loi de **Lenz** ($e = -\frac{d\phi}{dt}$), explique que la f.e.m induite créée dans les conducteurs rotoriques s'oppose à la cause qui lui a donné naissance, donc elle s'oppose à la variation du

flux. Le rotor va tourner dans la même direction que le champ statorique pour tenter de le rattraper [1].

La rotation du rotor est engendrée par l'apparition des forces de **Laplace**, qui sont un résultat de l'interaction entre le champ tournant et les courants induits :

$$d\vec{F} = \vec{I} \cdot d\vec{L} \wedge \vec{B} \quad [\text{I-3}]$$

Le rotor n'arrivera jamais à tourner à la même vitesse que le champ statorique, cet écart avec la vitesse de synchronisme joue un rôle fondamental, il est défini par un paramètre important dit : **glissement**.

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{N_s - N}{N_s} \quad [\text{I-4}]$$

$$\Omega = (1 - g)\Omega_s \quad [\text{rd/s}] \quad [\text{I-5}]$$

En fonctionnement normal, la fréquence des f.e.m et des courants rotoriques est très faible, elle est donnée en fonction du glissement (1) :

$$f_r = g \cdot f \quad [\text{Hz}] \quad [\text{I-6}]$$

Avec :

f : fréquence du réseau [Hz].

ω_s : Pulsation électrique du champ tournant [rd/s].

N_s : Vitesse de synchronisme [tr/min].

N : Vitesse de rotation du rotor [tr/min].

Ω_s : Vitesse mécanique synchrone de rotation du champ tournant [rd/s].

Ω : Vitesse mécanique de rotation du rotor [rd/s].

P : nombre de paires de pôles.

I-4 Bilan des puissances :

Lors de la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique, apparaît une forme intermédiaire d'énergie, c'est l'énergie électromagnétique. L'énergie électrique absorbée est en partie transformée en énergie mécanique utile, une autre partie stockée sous forme d'énergie magnétique, le reste étant dissipé sous forme de pertes, d'où le bilan de puissance suivant [5] :

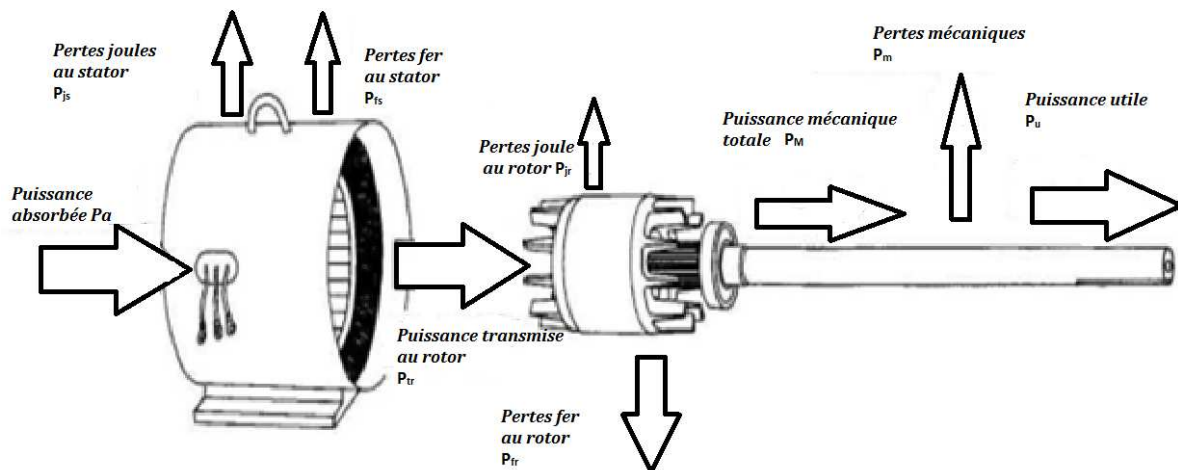


Figure (I-2) : Représentation des différentes puissances

I-4.1 Puissance électrique absorbée P_{ab} :

La puissance électrique absorbée par un stator d'un moteur asynchrone quel que soit le couplage de ses bobines (étoile ou triangle) est :

$$P_{ab} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi \quad [\text{W}] \quad [\text{I-7}]$$

Avec :

U : tension composée aux bornes du moteur [V].

I_1 : courant de ligne [A].

$\cos \varphi$: Facteur de puissance.

I-4.2 Puissance transmise au rotor P_{tr} :

La puissance transmise au rotor est la puissance du champ magnétique tournant, que l'on appelle aussi puissance électromagnétique.

$$P_{tr} = P_a - P_{js} - P_{fs} \quad [\text{W}] \quad [\text{I-8}]$$

I-4.3 Puissance mécanique totale P_M :

La puissance mécanique c'est la puissance transmise à l'arbre du moteur.

$$P_M = P_{tr} - P_{jr} - P_{fr} \quad [\text{W}] \quad [\text{I-9}]$$

I-4.4 Puissance utile P_u :

C'est la puissance transmise à la charge, on peut la déterminer en connaissant les pertes mécaniques.

$$P_u = P_M - P_m \quad [\text{W}] \quad [\text{I-10}]$$

I-5 Les différentes pertes :

I-5.1 Pertes joules au stator P_{js} :

Elles représentent les pertes ohmiques dans l'enroulement statorique, donc l'énergie dissipée sous forme de chaleur. Elles varient en fonction du carré des courants circulant dans ces enroulements.

$$P_{js} = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2 \quad [\text{W}] \quad [\text{I-11}]$$

Avec :

R_s : Résistance d'une phase statorique $[\Omega]$.

I_s : courant efficace traversant une phase d'enroulement statorique $[\text{A}]$.

I-5.2 Pertes fer au stator P_{fs} :

Les pertes fer rassemblent les pertes par courant de Foucault et les pertes par cycle d'Hystérésis, elles sont en fonction du flux magnétique, donc elles dépendent de la tension d'alimentation et de la fréquence des courants statoriques. Or en régime de fonctionnement nominal, ces grandeurs ne varient pas, et par conséquent, les pertes fer peuvent être considérées comme constantes quel que soit la charge du moteur. Elles sont mesurées lors d'un essai à vide [5].

I-5.2.1 Pertes par courant de Foucault P_F :

Ce sont des pertes engendrées par la circulation des courants induits dans la masse du métal, qui sont dus à la variation du champ magnétique, ce phénomène a été découvert par le physicien français Léon Foucault en 1851. Elles sont proportionnelles au carré de la fréquence et de l'amplitude de l'induction [2].

$$P_F = K_f \cdot f^2 \cdot e^2 \cdot B_{max}^2 \quad [\text{W/Kg}] \quad [\text{I-12}]$$

Avec:

K_f : Constante caractérisant la tôle. Voir l'abaque annexe 3.

B_{max} : Induction magnétique maximale [T].

e : épaisseur d'une tôle magnétique [mm].

f : fréquence du réseau [Hz].

I-5.2.2 Pertes par cycle d'Hystérésis P_H :

L'Hystérésis est le retard de l'effet sur la cause. Donc ces pertes sont dues au fait que les domaines du métal présentent une certaine constante de temps avant de s'orienter, il existe un retard entre l'application du champ et l'apparition de l'induction.

Elles sont proportionnelles à la fréquence f , et au carré de l'induction [2].

$$P_H = K_h \cdot f \cdot B_{max}^2 \quad [\text{W/Kg}] \quad [\text{I-13}]$$

Avec:

K_h : Constante caractérisant la tôle. Voir l'abaque annexe 3 page [57].

I-5.3 Pertes joule au rotor P_{jr} :

Elles représentent les pertes ohmiques dans le rotor. Quel que soit à cage ou a rotor bobiné, elles sont en fonction de la puissance transmise et du glissement [5].

$$P_{jr} = g \cdot P_{tr} \text{ [W]} \quad \text{[I-14]}$$

Avec :

g : glissement.

I-5.4 Pertes fer au rotor P_{fer} :

Les pertes fer au rotor dépendent de la fréquence des courants rotoriques, la fréquence des courants rotoriques étant faibles, en pratique, on peut négliger ces pertes [5].

I-5.5 Pertes mécaniques P_{mec} :

Elles regroupent les pertes par frottement et les pertes par ventilation, elles dépendent uniquement de la vitesse de rotation du moteur. Puisque la vitesse de rotation du moteur varie peu avec la charge donc on peut considérer ces pertes comme constantes. On peut les déterminer à l'aide d'un essai à vide [5].

$$P_{mec} = K_T \cdot \left(\frac{N_s}{10}\right)^2 \cdot (D_{1ext} \cdot 10^{-3})^4 \text{ [W]} \quad \text{[I-15]}$$

Avec:

K_T : Facteur de majoration, il est donné en fonction du nombre de paires de pôles et le diamètre du rotor.

$$K_T = 1,3 \cdot (1 - D_{1ext}) \text{ pour } 0,1 \leq D_{1ext} \leq 0,5 \text{ m}$$

D_{1ext} : Diamètre extérieur du stator.

N_s : Vitesse de rotation synchrone [tr/min].

I-5.6 Pertes supplémentaires P_{sup} :

Les discontinuités géométriques d'une machine au niveau de l'entrefer créent des flux de fuite harmoniques de phase et d'encoche qui engendrent des pertes dans les conducteurs rotoriques des machines asynchrones dont l'entrefer est particulièrement faible. Ces harmoniques sont appelés harmoniques d'espace.

L'origine de ces pertes, dues aux flux de fuites harmoniques et d'inclinaison dans les conducteurs rotoriques. Elles sont difficiles à mesurer et à calculer mathématiquement à cause de la complexité des lignes de champ. Elles sont estimées à 0,5 % de la puissance absorbée [5].

$$P_{sup} = \frac{0,005 \cdot P_{unom} \cdot 10^3}{\eta_n} \text{ [W]} \quad \text{[I-17]}$$

Avec:

P_{unom} : Puissance utile nominale.

η_n : Rendement nominal.

Le diagramme suivant présente les pertes et leurs séparations.

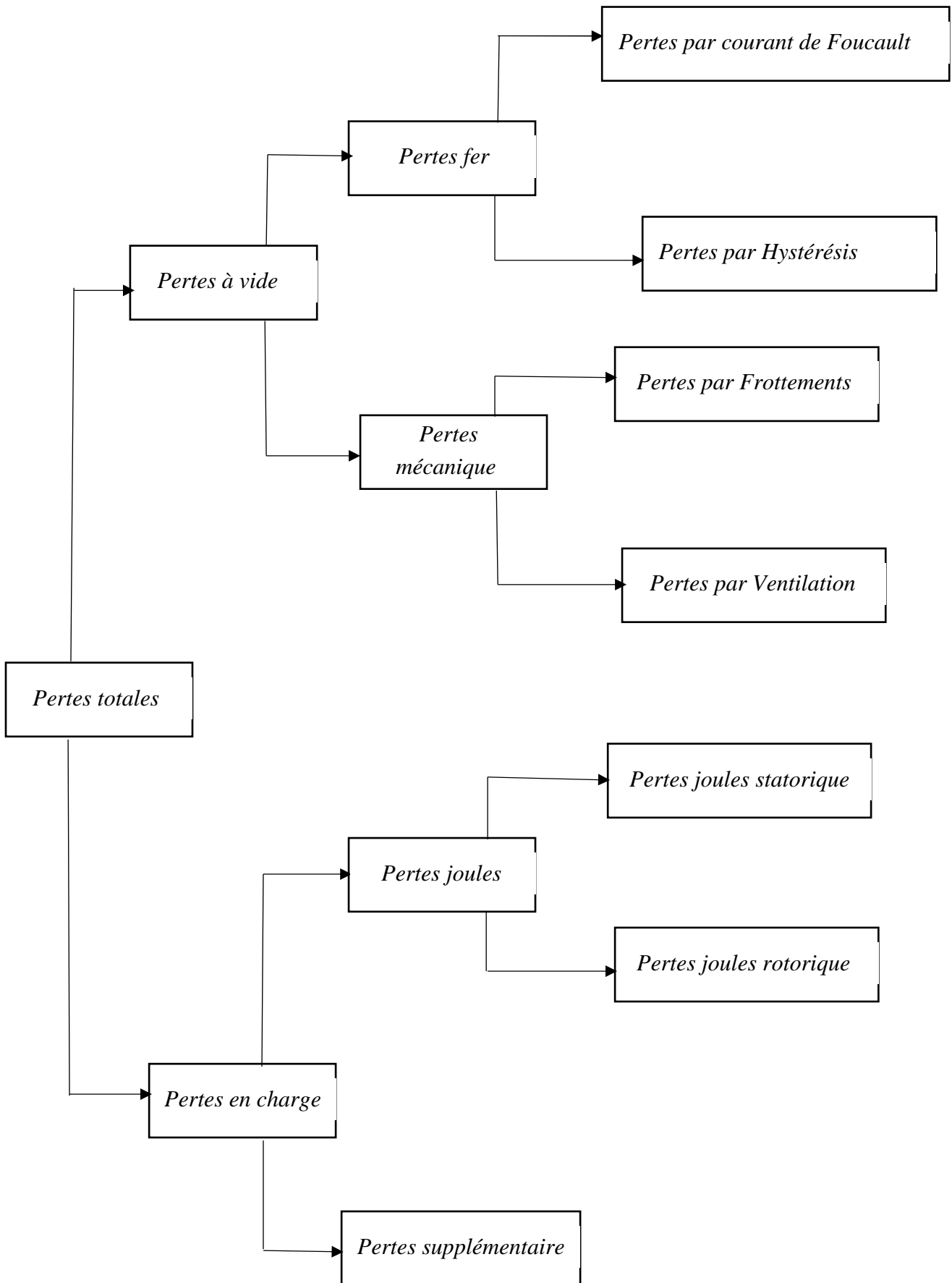


Figure (I-3) : Séparation des pertes dans le moteur asynchrone

I-6 Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté le moteur asynchrone du point de vue de sa construction, de son principe de fonctionnement.

Nous avons vu que le moteur asynchrone comprend essentiellement un stator fixe et un rotor tournant. Ces deux parties sont le siège de la transformation de l'énergie, cette transformation s'accompagne par des pertes d'énergie.

Les pertes totales est la somme de toutes les pertes, dans le circuit électrique et magnétique, dans la partie mécanique. Le calcul détaillé de ces pertes fera l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE II

CALCUL DES PERTES D'UN MOTEUR ASYNCHRONE PAR LA METHODE DE DIMENSIONNEMENT ET CIRCUIT ELECTRIQUE EQUIVALENT

II-1 Introduction :

Plusieurs méthodes ont été développées pour la détermination des paramètres d'un moteur asynchrone.

Ces paramètres sont généralement utilisés dans le développement des modèles qui donnent d'une manière plus au moins exacte les performances du moteur asynchrone dans ces différents modes de fonctionnement. De plus, l'utilisation croissante des moteurs asynchrones dans les vitesses variables nécessitent le dimensionnement des régulateurs dans l'efficacité dépend énormément de la bonne estimation des paramètres électriques.

Dans ce chapitre on s'intéresse au calcul des pertes d'un moteur asynchrone par la méthode de dimensionnement et par le circuit électrique équivalent.

II-2 calcul des pertes par la méthode de dimensionnement :

II-2.1 Pertes électriques :

On distingue les pertes joules statorique et rotorique.

II-2.1-a Pertes joule statorique :

Elles sont données par la formule suivante :

$$P_{js} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad [\text{II-1}]$$

Avec : P_{js} : Pertes par effet joule au stator [W].

R_1 : Résistance d'une phase statorique [Ω].

I_1 : Le courant dans la phase statorique [A].

II-2.1-b pertes joule rotorique :

Elles sont données par la formule suivante :

$$P_{jr} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad [\text{II-2}]$$

Avec :

m_2 : Nombre de phase rotorique.

R_2 : Résistance d'une phase rotorique [Ω].

I_2 : Le courant dans la barre rotorique [A].

Les grandeurs électriques R_1 , I_1 , R_2 et I_2 sont calculées suivant le cahier de charge (plaque signalétique) voir annexe 1.

II-2.2 Pertes mécaniques :

Elles sont données par l'expression suivante :

$$P_{mec} = K_t \left(\frac{N_s}{10} \right)^2 \cdot (D_{1ext} \cdot 10^{-3})^4 \quad [\text{II-3}]$$

Avec :

K_t : Facteur de majoration, il est donné en fonction du nombre de paires de pôles et diamètre extérieur du rotor.

$$K_t = 1,3(1 - D_{2ext}) \quad \text{Pour} \quad 0,1 \leq D_{2ext} \leq 0,5 \text{ m}$$

$$\text{Dans notre cas pour} \quad 2P=2 \quad K_t = 1$$

D_{2ext} : Diamètre extérieur du rotor.

N_s : Vitesse de rotation synchrone [tr/min].

II-2.3 Pertes magnétiques :

Ce sont des pertes par Hystérésis et par courant de Foucault dues aux flux principal, une grande partie de ces pertes se dissipent au niveau des dents et de la culasse statorique. Dans le rotor ces pertes sont négligeables à cause de la faible fréquence de la variation du flux au régime nominal.

III-2.3-a Pertes fer :

Les pertes fer sont la somme des pertes par hystérésis qui résultent de la transformation de l'organisation de la matière sous l'effet de la variation en intensité et en direction du champ magnétique appliqué, et les pertes par courant de Foucault qui sont dues aux courants créés dans la tôle par la F.E.M.

$$P_f = P_{10(50hz)} \cdot (f_{1/50})^\beta B_{c1}^2 \quad [\text{II-4}]$$

Avec :

P_f : Pertes spécifiques dans les tôles d'acier [W].

B_{c1} : Induction magnétique dans la culasse du stator [T].

β : Indice de puissance.

II-2.3-b Pertes dans la culasse statorique :

On obtient les pertes dans la culasse statorique par la multiplication des pertes spécifiques calculées, pour une induction B_{c1max} (induction maximale dans la culasse) par la masse d'acier de la culasse, mais en tenant compte de la magnétisation qui est elliptique sur la

frontière avec la couche des dents et pulsatoire sur la périphérie et de l'influence de l'usinage de l'isolation des tôles dans la culasse en introduisant le coefficient de majoration.

$$P_{fc1} = P_{10(50hz)} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \cdot K_{dc} \cdot G_{c1} \cdot B_{c1max}^2 \quad [\text{II-5}]$$

Avec :

K_{dc} : Coefficient total de majoration des pertes tenant compte de l'imperfection de la technologie. Voir l'annexe 3. $K_{dc} = (1,3 \div 1,7)$.

$P_{10(50hz)}$: Pertes spécifiques dans les tôles d'acier.

G_{c1} : Le poids total de la culasse.

B_{c1max} : Induction maximale dans la culasse statorique (le calcul précis de B_{c1max} est présenté dans l'annexe 1).

II-2.3-C Pertes dans les dents statoriques :

Les dents sont soumises à une magnétisation pulsatoire. On a donc ici à tenir compte seulement de l'augmentation des pertes dues à l'usinage des dents et des pertes liées aux harmoniques supérieurs de l'induction.

Les pertes dans les dents sont calculées par la relation suivante :

$$P_{fz1} = K_{dz} \cdot B_{z1max}^2 \cdot G_{z1} \cdot P_{10(50hz)} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta \quad [\text{II-6}]$$

Avec :

G_{z1} : Poids total des dents.

K_{dz} : Coefficient de majoration des pertes (coefficient des pertes supplémentaires).

$$K_{dz} = (1,7 \div 1,8)$$

B_{z1max} : Induction maximale dans les dents statoriques, voir annexe (1).

Enfin, les pertes principales sont données par la somme des pertes dans la culasse et dans les dents statoriques et sont calculées par la formule suivante :

$$P_{acp} = P_{fc1} + P_{fz1} \quad [\text{II-7}]$$

II-2.4 Pertes magnétiques supplémentaires d'acier :

Les pertes supplémentaires sont les pertes à la surface du rotor et les pertes par harmonique du flux dans les dents statoriques et rotoriques.

$$P_{acsup} = P_{sr} + P_{pul} \quad [\text{II-8}]$$

II-2.4-a Pertes à la surface du rotor ou pertes superficielles :

Les pertes superficielles apparaissent à la surface du rotor par la présence d'encoche ouverte du stator :

$$P_{sr} = P_{sr2}(t_2 - b_{f2}) \cdot l_i \cdot Z_2 \cdot 10^{-6} \quad [\text{II-9}]$$

Avec :

$$P_{sr2} = 0,5 \cdot K_{02} \left(\frac{Z_1 \cdot N_s}{10^4} \right)^{3/2} \cdot (B_{02} \cdot t_1)^2 \quad [\text{II-10}]$$

Avec :

$$K_{02} = 0,98$$

K_{02} : Coefficient en fonction du diamètre extérieur.

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot K_{\delta} \cdot B_{\delta}$$

$$B_{02} = 0,12$$

Z_1 : Nombre d'encoches statoriques.

N_s : La vitesse de synchronisme [tr/min].

t_2 : Pas dentaire.

B_{δ} : Induction dans l'entrefer.

K_{δ} : Coefficient de Carter. Déterminé à partir de l'abaque (voir annexe 3 page [57]).

β_{02} : Coefficient déterminé à partir de l'abaque (voir annexe page [57]).

l_i : Longueur de l'induit.

II-2.4-b Pertes par harmonique du flux dans les dents :

Par la présence des encoches statoriques et rotoriques, l'induction dans les dents varie avec la position respective de celui-ci. Les oscillations du flux dans les dents, consécutives à ce phénomène, créent des pertes supplémentaires ou pertes par pulsation du flux qui sont données par l'expression suivante :

$$P_{pul} = 0,11 \left[\left(\frac{Z_1 N_s}{10^3} \right) B_{pul2} \right]^2 \cdot G_{z2} \quad [\text{II-11}]$$

$$B_{pul2} = \left[\frac{\gamma_1 \cdot \delta \cdot B_{z2max}}{2 \cdot t_2} \right] \quad [\text{II-12}]$$

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{f1}}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_{f1}}{\delta}} \quad [\text{II-13}]$$

$$G_{z2} = Z_2 \cdot h_{c2} \cdot b_{z2} \cdot l_i \cdot K_{fer} \cdot \gamma_c \cdot 10^{-9} \quad [II-14]$$

Avec :

B_{z2max} : Induction de l'encoche rotorique

G_{z2} : La masse totale des dents rotoriques.

δ : Epaisseur de l'entrefer.

II-2.5 Pertes totales dans l'acier :

Les pertes totales dans l'acier sont égales à la somme des pertes principales et supplémentaires dans l'acier, elles sont calculées par la relation suivante :

$$P_{ac\Sigma} = P_{acp} + P_{acsup} \quad [W] \quad [II-15]$$

II-2.6 Pertes supplémentaires :

L'origine de ces pertes, c'est le champ de fuite dans les encoches et dans les têtes de bobines, elles sont difficiles à mesurer et à calculer mathématiquement à cause de la complexité des lignes de champ, elles sont estimées à 0,5 % de la puissance absorbée :

$$P_{sup} = 0,005 \cdot \frac{P_{2nom} 10^3}{\eta_n} \quad [W] \quad [II-16]$$

Avec:

P_{2nom} : Puissance utile.

η_n : Rendement nominal.

II-2.7 Pertes totales du moteur :

C'est la somme de toutes les pertes :

$$P_{Tot} = P_{js} + P_{jr} + P_{mec} + P_{ac\Sigma} + P_{sup} \quad [W] \quad [II-17]$$

II-2.8 Le rendement :

Le rendement du moteur est le rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Tot}} \quad [II-18]$$

Les résultats de ce tableau sont calculer à partir d'un programme informatique réalisé avec le logiciel « MATHCAD » par la méthode de dimensionnement.

Pour voir les résultats de calcul pour la tension nominale $U_n=380$ V se rendre à l'annexe 1.

U [V]	P _{js} [W]	P _{jr} [W]	P _{sup} [W]	P _{fer} [W]	P _{mec} [W]	P _{tot} [W]	P _{ab} [W]	η [%]
380	365,93	248,25	24,09	91	75,16	804,45	4804,45	83

Tableau1 : puissances et pertes calculées par dimensionnement à tension nominale.

II-3 Calcul des pertes par la méthode du circuit équivalent :

Dans cette partie de ce chapitre on présente la deuxième méthode de calcul des pertes en utilisant le schéma électrique équivalent, en déterminant préalablement les paramètres du moteur asynchrone étudié par différents essais.

II-3.1 Essais à effectuer :

On aura besoin :

- 1)Un essai à courant continu pour déterminer la résistance statorique.
- 2)Un essai à vide.
- 3)Un essai à rotor bloqué.

II-3.2 Le schéma électrique équivalent :

Dans notre travail on a choisit le schéma électrique en T, avec toutes les grandeurs secondaires (rotor) ramenées au primaire (stator) avec prise en compte des pertes fer, par rapport à sa simplicité et sa précision [3].

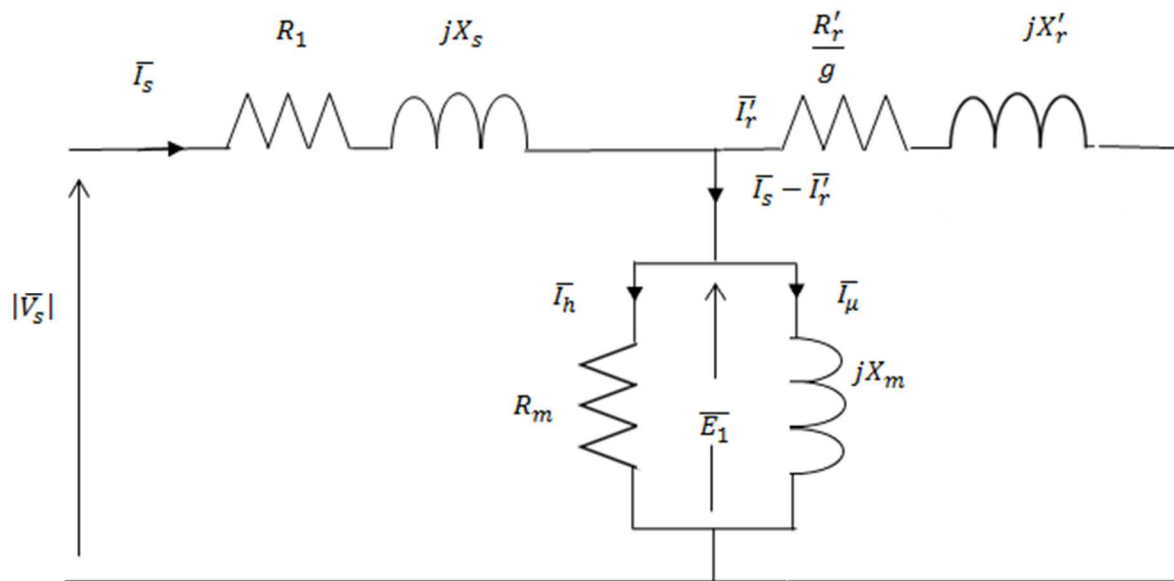


Figure (II-1) : schéma électrique équivalent ramené au stator de la MAS.

II-3.3 Détermination de la résistance statorique R_s :

La mesure de la résistance est faite par la méthode volt-Ampèremétrique, réalisée sur les trois phases du moteur. Cet essai nécessite une source d'alimentation en courant continu, un voltmètre et un ampèremètre afin de mesurer respectivement la tension et le courant qui caractérisent la résistance suivant la loi d'ohm :

$$R_s = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad \text{[II-19]}$$

Il faut prendre plusieurs mesures pour différentes valeurs de tension. La résistance statorique sera la moyenne de ces résistances mesurées.

En tenant compte de l'écart entre la valeur mesurée et la valeur moyenne, qui ne doit pas dépasser une erreur supérieur à 5% [7].

II-3.4 Essai à vide

Dans cet essai, le moteur n'est pas accordé à une charge, on alimente le moteur sous différentes tensions et nous relevons les mesures suivantes :

- Tension d'alimentation V_0 en [V].
- Courant absorbé à vide I_0 en [A].
- Puissance absorbée à vide P_0 en [W].
- Vitesse de rotation N en [tr/min].

Le glissement g_0 obtenu à vide n'est pas faible, surtout pour les moteurs de grande puissance et le couple n'est pas réellement nul puisque le moteur doit vaincre ses propres frottements ; c'est pour cela que le glissement n'est pas vraiment nul. Cependant la résistance

fictive $\frac{R_r'}{g}$ est très grande devant les autres impédances et ce qui mène à un courant I_r' qui est négligeable devant le courant I_0 [7].

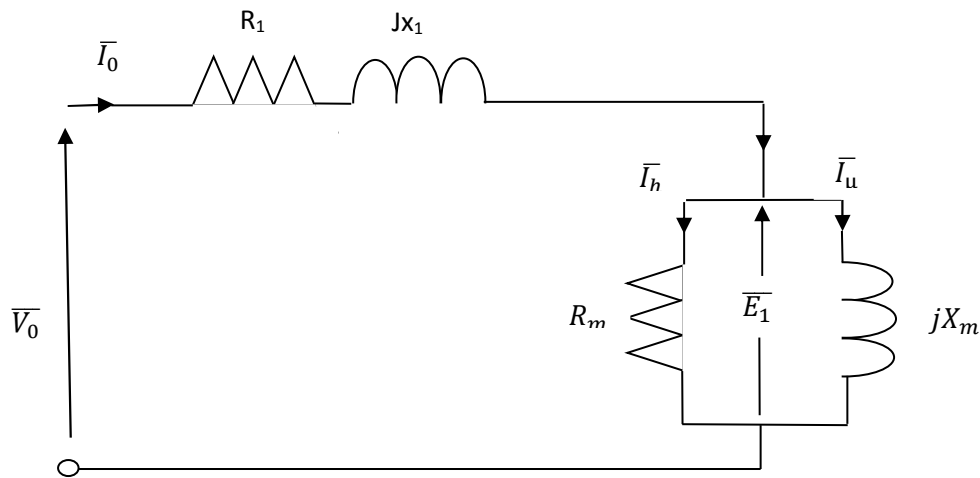


Figure (II-3) : Schéma électrique équivalent à vide.

II-3.5 Détermination des pertes fer et des pertes mécaniques :

La puissance électrique absorbée à vide P_0 correspond à la somme des pertes dans le fer du stator P_{fs} , les pertes par effet joule dans le stator P_{js} et les pertes mécaniques P_m .

$$P_0 = 3R_1 \cdot I_0^2 + P_{fer} + P_{mec} \quad [\text{W}] \quad \text{[II-20]}$$

$$P_0 - 3R_1 \cdot I_0^2 = P_{fer} + P_{mec} \quad [\text{W}] \quad \text{[II-21]}$$

En variant la tension d'alimentation de 0 jusqu'à la valeur nominale et connaissant les valeurs de I_0 et P_0 qui peuvent être mesurées respectivement à l'aide d'un ampèremètre et d'un wattmètre, on trace par la suite la courbe définie comme suit :

$$P_0 - 3R_s I_0^2 = f(V_{s0}^2)$$

Qui est une droite, le prolongement de cette droite jusqu'à couper l'axe des Y ($V=0$) nous donne la valeur des pertes mécaniques P_{mec} . Pour $V_0=V_n$ on aura les pertes fer.

$$P_{fer} = P_0 - 3R_s I_0^2 - P_{mec} \quad [\text{W}] \quad \text{[II-22]}$$

Ces pertes sont considérées constantes en régime nominal.

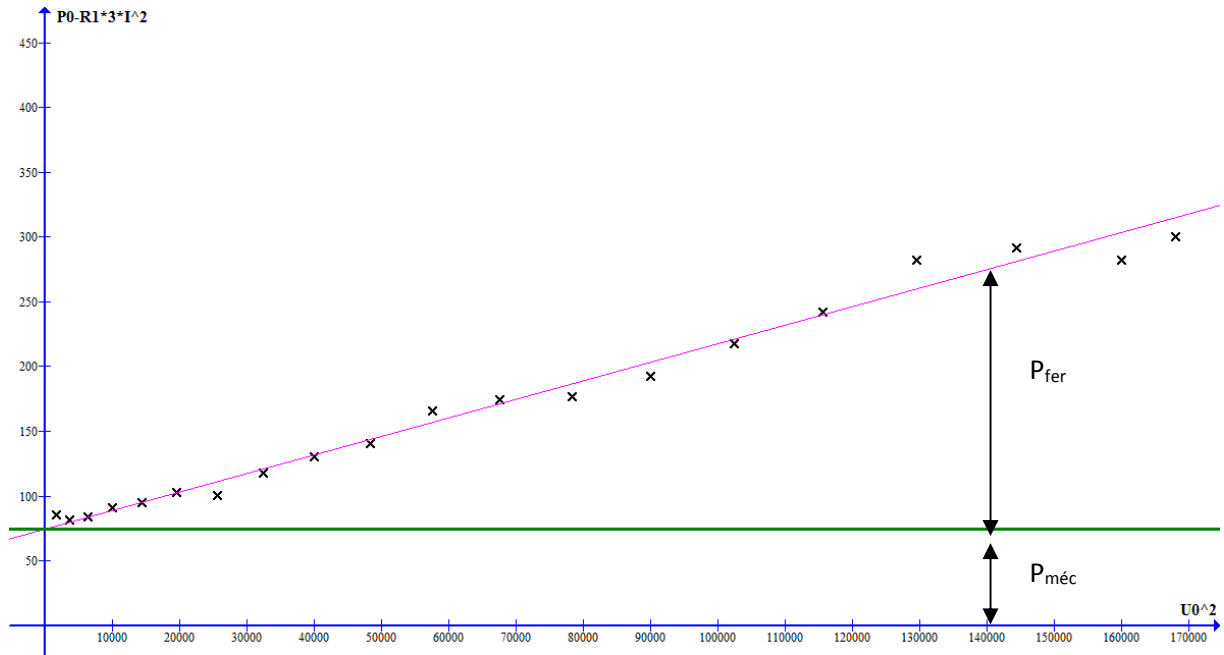


Figure (II-4) : Courbe des pertes fer et pertes mécaniques.

Quand on fait prolonger la droite vers l'axe des Y ($V=0$) on aura les pertes mécaniques $P_{mec}=74,6[W]$.

Au régime nominal $V=V_n=380V$ les pertes fer $P_{fer}=217,12[W]$.

II-3.6 Détermination de R_m et X_m :

L'équation électrique qui régit le schéma équivalent à vide est la suivante :

$$\bar{V}_0 = (R_1 + jX_s) \cdot \bar{I}_0 + \bar{E}_1$$

$$\bar{E}_1 = \bar{V}_0 - (R_1 + jX_s) \cdot \bar{I}_0$$

Avec :

$$\bar{E}_1 = R_m \cdot \bar{I}_h = X_m \cdot \bar{I}_\mu$$

$$\begin{cases} I_h = I_0 \cdot \cos\varphi_0 \\ I_\mu = I_0 \cdot \sin\varphi_0 \end{cases}$$

- Facteur de puissance à vide :

$$P_0 = \sqrt{3} \cdot V_0 \cdot I_0 \cdot \cos\varphi_0$$

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot V_0 \cdot I_0} \quad [II-23]$$

Avec :

V_0 : Tension nominale à vide [V].

P_0 et I_0 : Ils sont mesurés pour la valeur nominale de V_0 en [W.A]

- **La résistance magnétisante R_m :**

A vide :

$$\begin{cases} P_{fer} = 3R_m \cdot I_h^2 \\ E_1 = R_m \cdot I_h \end{cases}$$

$$\text{D'où : } R_m = \frac{3E_1^2}{P_{fer}} \quad [\Omega] \quad (\text{II-24})$$

- **Réactance magnétisante X_m :**

$$\begin{aligned} \bar{E}_1 &= X_m \cdot \bar{I}_\mu \\ X_m &= \frac{\bar{E}_1}{\bar{I}_\mu} \end{aligned}$$

D'où :

$$X_m = \frac{E_1}{I_0 \cdot \sin\varphi_0} \quad [\Omega] \quad (\text{II-25})$$

II-3.7 Essai à rotor bloqué :

Dans cet essai on bloque le rotor afin d'empêcher sa rotation ($\Omega=0$ $g=1$).

On alimente le moteur sous tension réduite de façon à ne pas dépasser le courant nominal et on mesure :

- Tension nominale d'alimentation V_{cc} [V]
- Courant nominal statorique I_{cc} [A]
- Puissance nominal absorbée P_{cc} [W]

L'essai à rotor bloqué, appelé aussi essai en court-circuit car le courant absorbé par le moteur est très élevé. Le courant magnétisant est négligeable par rapport au courant I_{cc} , d'où le schéma électrique équivalent en court-circuit suivant :

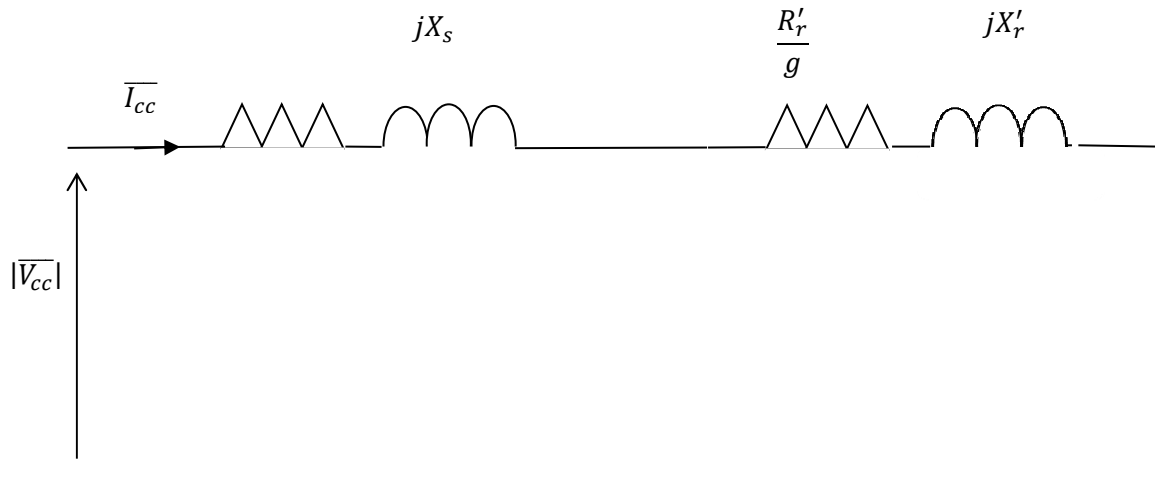


Figure (II-5) : Schéma équivalent en court-circuit.

II-3.7.1 Expression de la résistance R'_r :

La puissance électrique absorbée à rotor bloqué P_{cc} correspond à la somme des pertes par effet joule dans le stator P_{js} et les pertes par effet joule au rotor P_{jr} .

$$P_{cc} = 3(R_1 + R'_r) \cdot I_{cc}^2 \quad [\text{W}]$$

D'où :

$$R'_r = \frac{P_{cc}}{3 \cdot I_{cc}^2} - R_1 \quad [\Omega] \quad [\text{II-26}]$$

II-3.7.2 Expression de la réactance de fuite :

L'impédance vue aux bornes de la tension d'alimentation est :

$$Z_{cc} = \frac{\overline{V_{cc}}}{I_{cc}} \quad [\Omega]$$

Avec :

$$Z_{cc} = (R_s + R'_s) + j(X_s + X'_r)$$

On note que :

$$R_{cc} = (R_s + R'_s)$$

$$X_{cc} = (X_s + X'_r)$$

- Facteur de puissance en court-circuit :

$$P_{cc} = \sqrt{3} \cdot V_{cc} \cdot I_{cc} \cdot \cos \varphi_{cc}$$

D'où :

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} \cdot V_{cc} \cdot I_{cc}} \quad [\text{II-27}]$$

On peut écrire aussi :

$$R_{cc} = Z_{cc} \cdot \cos \varphi_{cc}$$

$$X_{cc} = Z_{cc} \cdot \sin \varphi_{cc}$$

Puisque :

$$Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}$$

Donc :

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} \quad [\Omega]$$

Pour les moteurs bobinés et les moteurs à cage de petite puissance, la réactance de fuite statorique est égale à celle rotorique, mais pour les moteurs de grande puissance le rapport $\frac{X_s}{X_r}$ est donné par le constructeur.

$$X_s = X_r = \frac{1}{2} \cdot X_{cc}$$

$$X_s = X_r = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{Z_{cc}^2 - (R_1 + R_r')^2} \quad [\Omega]$$

Les résultats de ce tableau sont calculés à partir d'un programme informatique réalisé avec le logiciel « MATLAB » par la méthode de circuit équivalent :

Paramètres	X_m [Ω]	X_s [Ω]	X_r' [Ω]	R_m [Ω]	R_r' [Ω]	E_1 [V]
Valeurs	239.59	7.04	7.04	1867,9	3.20	367.67

Tableau 2 : Valeurs des paramètres du circuit électrique équivalent.

II-4 Expression des caractéristiques du moteur asynchrone obtenu à partir du schéma équivalent:

II-4.1 Expression des différentes impédances du schéma équivalent :

L'expression de l'impédance globale ou impédance d'entrée du schéma équivalent est donnée par :

$$\overline{Z}_e = \overline{Z}_1 + \frac{\overline{Z}_2 \cdot \overline{Z}_m}{\overline{Z}_2 + \overline{Z}_m} \quad [\Omega] \quad [\text{II-28}]$$

Avec :

$$\bar{Z}_1 = R_1 + jX_s \quad \text{Impédance d'une phase de l'enroulement statorique } [\Omega]$$

$$\bar{Z}_2 = \frac{R'_r}{g} + jX'_r \quad \text{Impédance d'une phase de l'enroulement rotorique } [\Omega]$$

$$\bar{Z}_m = \frac{jR_m \cdot X_m}{R_m + jX_m} \quad \text{Impédance équivalente de la branche magnétisante } [\Omega]$$

II-4.2 Expression du courant primaire I_s :

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{V}_s}{\bar{Z}_e} \quad [\text{A}] \quad [\text{II-29}]$$

II-4.3 Expression du courant secondaire ramené au stator :

En appliquant le diviseur de courant, on trouve :

$$\bar{I}'_r = \frac{\bar{Z}_m}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_m} \cdot \bar{I}_s$$

Remplaçant \bar{I}_s par son expression trouvée précédemment :

$$\bar{I}'_r = \frac{\bar{Z}_m}{(\bar{Z}_2 + \bar{Z}_m) \cdot (\bar{Z}_1 + \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_m}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_m})} \cdot \bar{V}_s \quad [\text{A}] \quad [\text{II-30}]$$

II-4.4 Expression du courant magnétisant :

En appliquant le diviseur de courant, on trouve :

$$\bar{I}_m = \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_m} \cdot \bar{I}_s$$

Remplaçant \bar{I}_s par son expression trouvée précédemment :

$$\bar{I}_m = \frac{\bar{Z}_2}{(\bar{Z}_2 + \bar{Z}_m) \cdot (\bar{Z}_1 + \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_m}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_m})} \cdot \bar{V}_s \quad [\text{A}] \quad [\text{II-31}]$$

II-4.5 Expression du facteur de puissance

On sait que :

$$\bar{Z}_2 = \text{Re}(Z_e) + j\text{Im}(Z_e)$$

$$\bar{Z}_2 = \frac{\bar{V}_s}{\bar{I}_s}$$

D'où :

$$|\overline{Z_e}| = \frac{|\overline{V_s}|}{|\overline{I_s}|}$$

$$\cos \varphi = \frac{\text{Re}(Z_e)}{|\overline{Z_e}|}$$

Donc :

$$\cos \varphi = \frac{\text{Re}(Z_e) \cdot |\overline{I_s}|}{|\overline{V_s}|} \quad [\text{II-32}]$$

Avec :

Re : partie réelle de l'impédance Z_e

Im : partie imaginaire de l'impédance Z_e

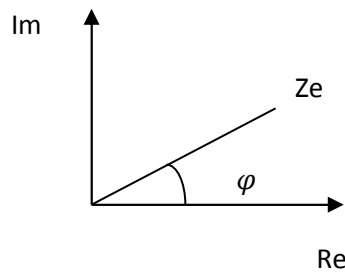


Figure (II-6) : Présentation trigonométrique de l'impédance Z

II-4.6 Expression de la puissance absorbée :

$$P_{ab} = 3 \cdot |\overline{V_s}| \cdot |\overline{I_s}| \cdot \cos \varphi \quad [\text{W}] \quad [\text{II-33}]$$

II-4.7 Expression de la puissance transmise:

C'est la puissance transmise au rotor :

$$P_{tr} = P_{ab} - P_{js} - P_{fs} \quad [\text{W}] \quad [\text{II-34}]$$

II-4.8 Expression de la puissance utile:

C'est la puissance transmise à la charge :

$$P_u = P_{ab} - (P_{js} + P_{jr} + P_{fer} + P_{mec}) \quad [\text{W}] \quad [\text{II-35}]$$

II-4.9 Expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s} \quad [\text{N.m}] \quad [\text{II-36}]$$

II-4.10 Expression du couple utile :

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} \quad [\text{N.m}] \quad [\text{II-37}]$$

II-4.11 Expression du rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ab}} \quad [\text{II-38}]$$

II-5 Conclusion :

La première méthode utilisée consiste à calculer les différentes pertes en se rabattant sur les dimensions géométriques et électriques (plaque signalétique) fournies par le constructeur.

La deuxième méthode permet de déterminer les différentes pertes en se basant sur les paramètres identifiés par le schéma électrique équivalent en (T) ramené au stator, et en utilisant l'essai à vide et l'essai en court-circuit.

Une étude comparative sera faite pour savoir laquelle des méthodes (dimensionnement et circuit équivalent par rapport aux points expérimentaux) nous donnent de meilleurs résultats.

Dans le chapitre qui suit, une répartition des pertes sera faite dans les différentes parties de la machine.

CHAPITRE III

REPARTITION DES PERTES DANS LES DIFFERENTES PARTIES D'UN MOTEUR ASYNCHRONE A CAGE

III.1 Introduction :

Dans le présent chapitre on s'intéresse à la répartition des pertes dans différentes parties du moteur.

III.2 Répartition des pertes de puissance dans la machine :

Dans ce qui suit nous allons faire la répartition des pertes de la machine par rapport à 100% de la puissance absorbée puis par rapport à 100% des pertes totales dans la machine à vide et en charge.

III.2-1 Répartition des puissances dans le moteur à vide :

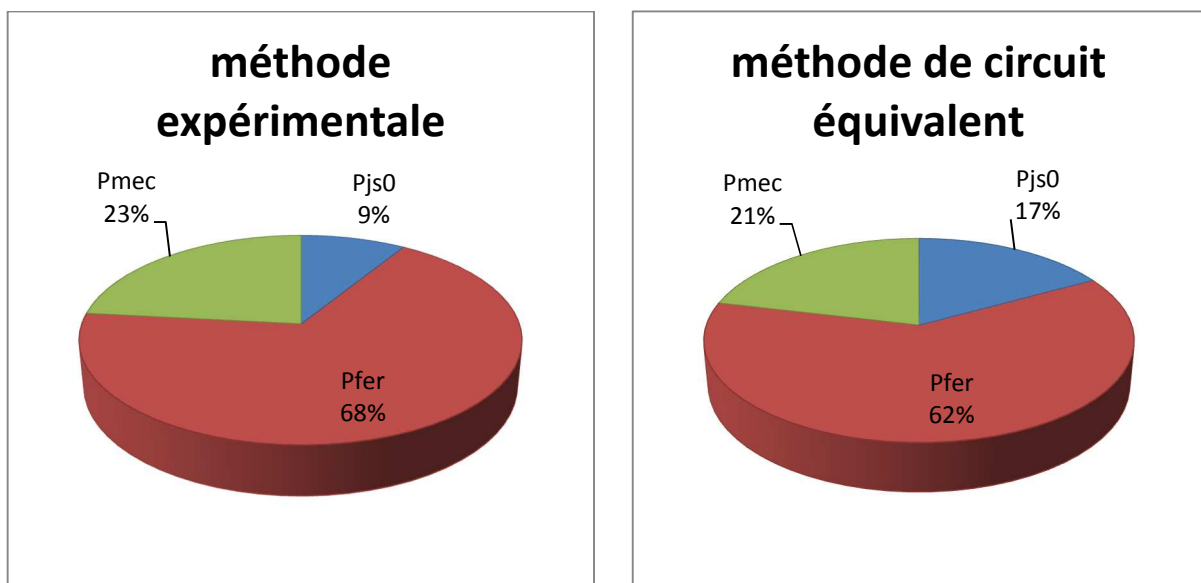


Figure 1 : Répartition des pertes à vide expérimentale et par circuit équivalent

Interprétation :

A vide, la puissance absorbée est dissipée sous forme de différentes pertes :

- Pertes joules statoriques
- Pertes fer statorique
- Pertes joules rotoriques
- Pertes fer rotorique
- Pertes mécaniques

A vide le moteur n'est pas couplé à une charge, donc la puissance utile est nulle.

Les deux méthodes (expérimentale et circuit équivalent) nous donnent des résultats très proches pour l'essai à vide.

III-3 Essai en charge nominale :

III-3.1 A 100% de la puissance absorbée :

En charge nominale, la puissance utile et les différentes pertes sont représentées par les trois méthodes comme suit :

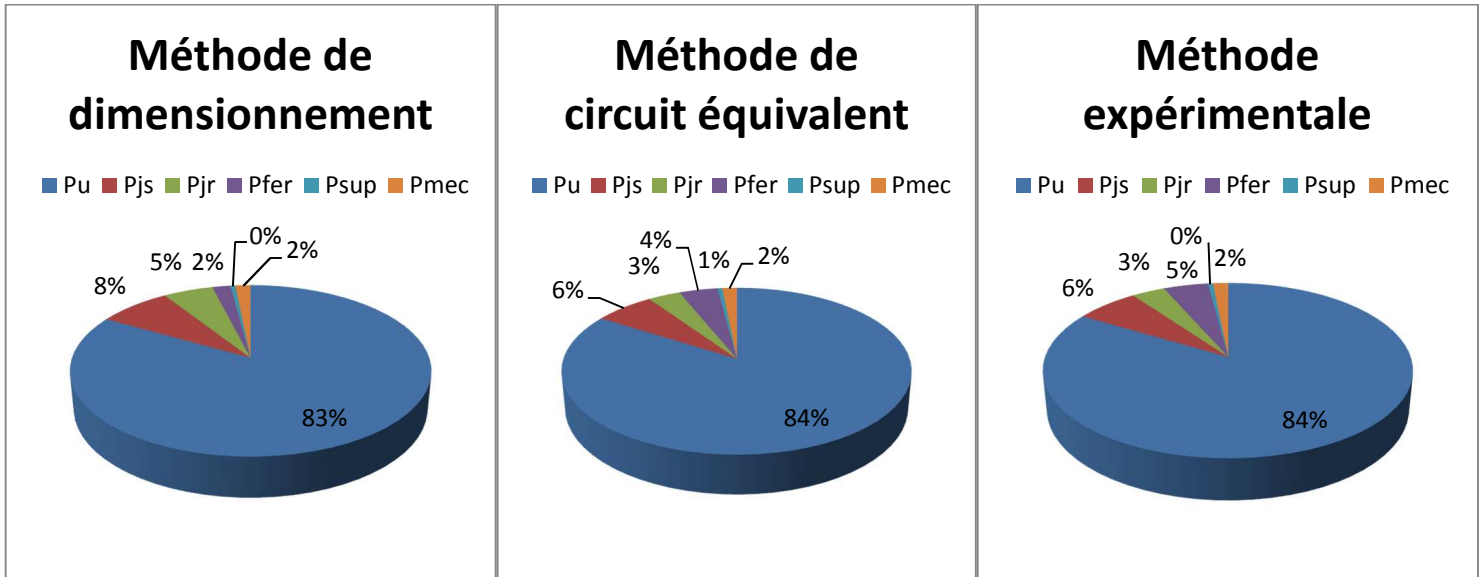


Figure 2 : Répartition à 100% de la puissance absorbée avec les trois méthodes

Interprétation :

La répartition des pertes données par les trois méthodes est la même, la différence réside au niveau des valeurs des pertes, puisque chaque pertes est calculée suivant les paramètres de cette dernière qui sont souvent différents.

III-3.2 Répartition des pertes totales :

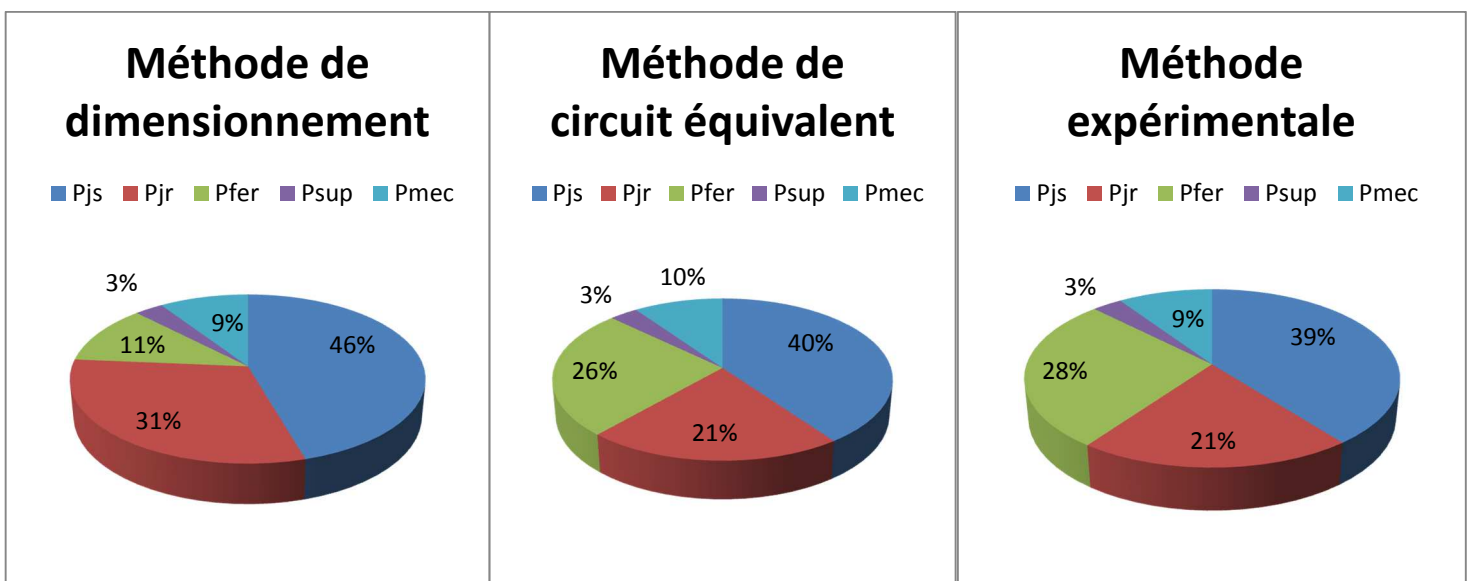


Figure 3 : Répartition des pertes totales avec les trois méthodes

Interprétation :

La répartition des pertes est différente, les valeurs des pertes sont aussi différentes puisque chaque méthode utilise ses propres paramètres pour le calcul de ces pertes.

Prenant un exemple : les pertes joule statorique sont calculées par :

- 1) Dimensionnement en tenant compte du courant et la résistance calculés par cette dernière $P_s=365,93$ W pour un $I_1=4,8$ A et $R_1= 5,28\Omega$
- 2) Méthode circuit équivalent $P_s=306,66$ W pour un $I_s= 4,65$ et $R_1=4.8\Omega$
- 3) Méthode expérimentale $P_s=310,66$ W pour $I_1=4,1$ A et $R_1=4,8\Omega$

III-4 Répartition des pertes joules dans l'enroulement statorique :

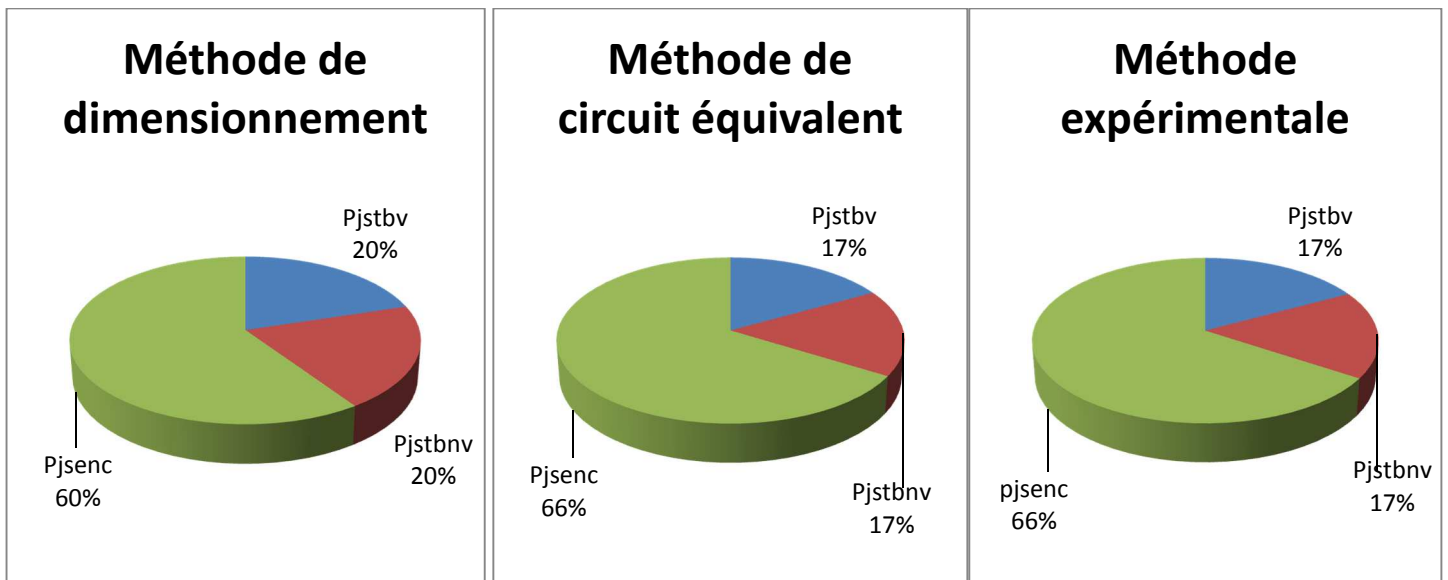


Figure 4 : Répartition des pertes joule stator expérimentale, circuit équivalent et dimensionnement

Interprétation :

En charge les pertes joule statorique se localisent principalement dans les encoches statoriques, environ 66% des pertes joules et la partie restante est remplie par des pertes joules dans les têtes de bobines côté ventilé et non ventilé avec 34% des pertes joules statoriques.

En considérant que la température est la même dans les deux côtés des têtes de bobines (ventilé et non ventilé).

La répartition des deux méthodes (circuit équivalent et expérimentale) est similaire, les pertes ont aussi des valeurs proches, puisque la résistance est la même dans les têtes de bobines et l'encoche. La différence réside au niveau du courant.

Quant à la méthode de dimensionnement la répartition est différente sur les deux dernières, puisque l'ordre des grandeurs est différent.

.III-5 Répartition des pertes joules dans l'enroulement rotorique :

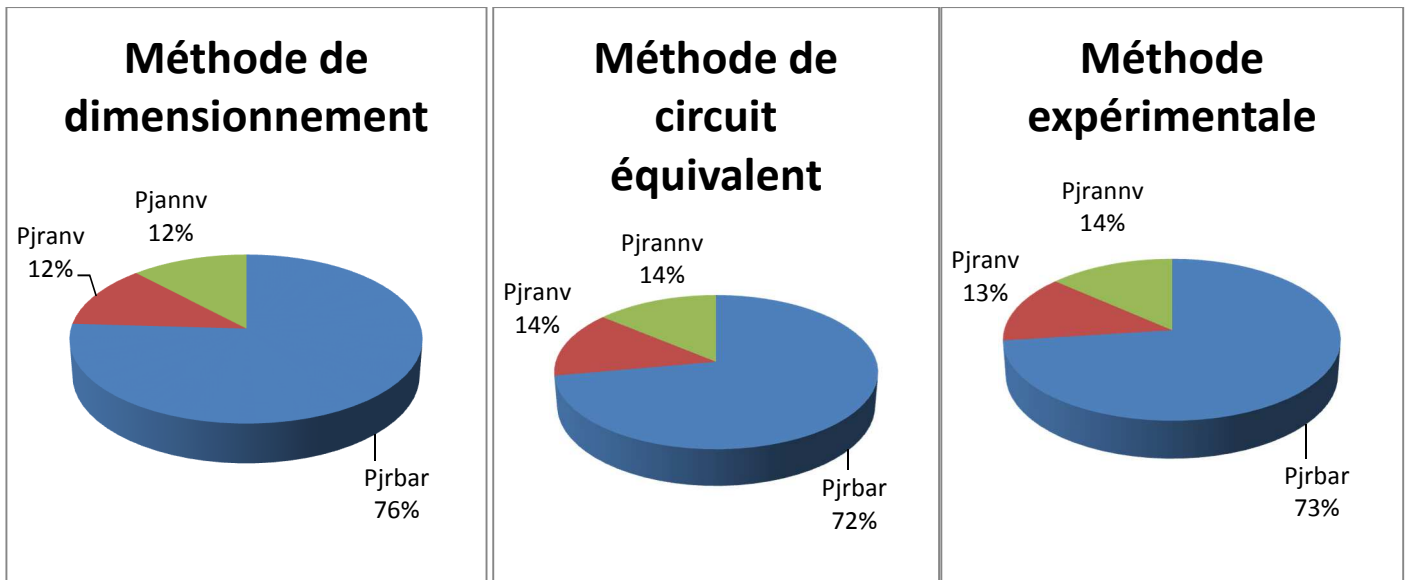


Figure 5 : Répartition des pertes joules rotor expérimentale, circuit équivalent et dimensionnement

Interprétation :

Les trois méthodes nous donnent presque les mêmes résultats.

Près de 75% des pertes joules rotoriques total sont des pertes joules dans les barres rotoriques. Les pertes joules dans les anneaux ne représentent que 25% des pertes joules totales à savoir du côté ventilé et non ventilé.

Les deux méthodes (circuit équivalent et expérimentale) donnent des résultats très proches, la résistance de la barre et de l'anneau sont pareilles pour les deux méthodes.

Par contre, le calcul de ces pertes par dimensionnement se base sur les dimensions géométriques.

III-6 Répartition des pertes fer dans le circuit magnétique:

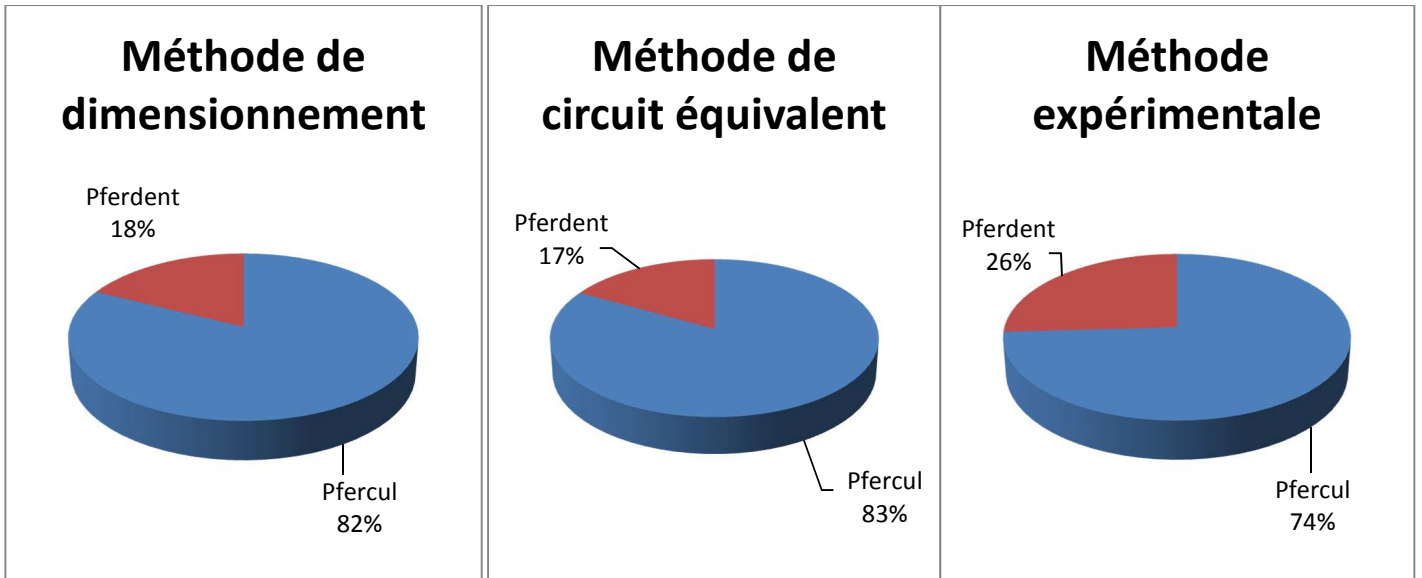


Figure 6 : Répartition des pertes fer expérimentale, circuit équivalent et dimensionnement

Interprétation :

Les pertes fer dans la culasse détiennent la majorité des pertes fer, environ 78% des pertes total dans le fer, quant aux pertes fer dans les dents elles représentent que 21% des pertes fer total.

La répartition par les trois méthodes est différente, puisque la méthode de dimensionnement repose sur des équations à différentes variantes (voir annexe 1), quant à la méthode expérimentale et circuit équivalent utilisent les mêmes volumes mais les valeurs des pertes sont différentes.

III-7 Répartition des pertes mécaniques :

On suppose que les pertes mécaniques sont réparties d'une façon égale dans les deux enroulements de la machine à savoir du côté ventilé et du côté non ventilé. Comme les pertes mécaniques sont égales à $P_{mec} = 75 \text{ W}$.

Donc :

- Pertes mécaniques du côté ventilé égale à $P_{mecv} = 37,5 \text{ W}$
- Pertes mécaniques du côté non ventilé égale à $P_{mecnv} = 37,5 \text{ W}$

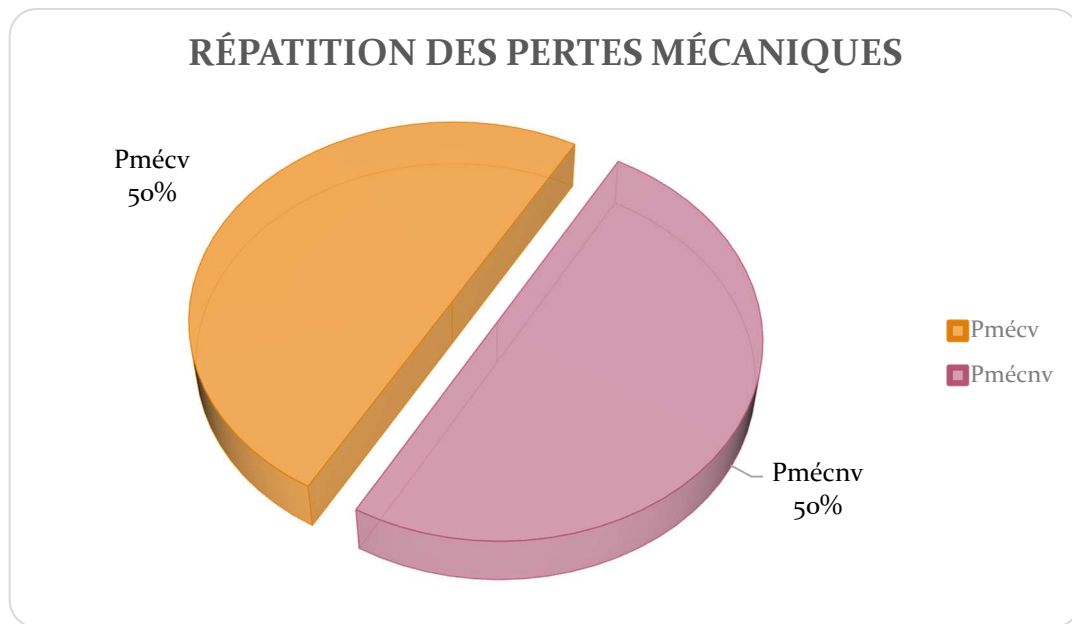


Figure 7 : Répartition des pertes mécanique

Interprétation :

Les pertes mécaniques sont causées essentiellement par deux phénomènes tel que :

- La ventilation qui tend à freiner l'arbre de la machine puisque il y a contact avec l'air.
- Les frottements causés par les deux roulements montés sur les extrémités du moteur.

En supposant que les pertes mécaniques sont réparties équitablement entre les deux côtés ventilé et non ventilé du moteur.

Le côté ventilé détient 50% des pertes mécaniques total, ainsi pour le côté non ventilé.

III-8 Conclusion :

Après avoir réparti les pertes dans les différentes parties de la machine,

On constate que :

- a. La majorité des pertes joule statorique sont composées de pertes dans les encoches statoriques, ils sont pour une valeur de 66% des pertes joules statoriques total.
- b. Les pertes joule rotorique sont situées majoritairement dans les barres d'aluminium, environ 75% des pertes joules rotorique total.
- c. Les pertes mécaniques sont supposées qu'elles sont réparties d'une façon égale côté ventilé et côté non ventilé.
- d. Les pertes fer résident presque totalement dans la culasse statorique, près de 78% des pertes fer total.

La différence envisagée au niveau du calcul des pertes par les trois méthodes est dû au seul fait que chaque méthode utilise ses propres paramètres.

CHAPITRE IV

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET COMPARAISON

IV-1 Introduction :

Dans ce chapitre on va déterminer les paramètres électriques de la machine tel que :

- 1) La résistance statorique.
- 2) La résistance et la réactance magnétisantes.
- 3) les réactances de fuite et de la résistance ramenée au rotor.

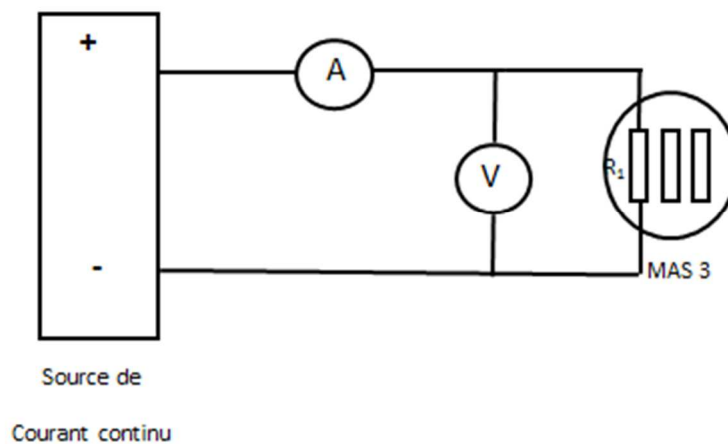
Avec ces paramètres on parvient au calcul des différentes puissances et pertes théoriques.

Par la suite on effectue une démarche comparative entre les courbes théoriques et celles basées sur les points expérimentaux.

IV-2 Détermination des paramètres électriques :

IV-2.1 Mesure de la résistance statorique :

Pour mesurer la résistance de l'enroulement statorique on a utilisé la méthode volt-ampérométrique, qui consiste à injecter un courant continu dans l'enroulement d'une phase statorique et de mesurer la tension et le courant sur plusieurs points.



Figure(IV.1) : Schéma du câblage de l'essai en courant continu

Les résultats obtenus sont dans les tableaux suivants :

U_{12} [v]	14	11	7,5	3,5	
I [A]	4	3	2	1	
R_1 [Ω]	3,5	3,66	3,75	3,5	$R_{1\text{moy}}=3,6$

Tableau 1 : Mesure de la résistance statorique phase U_{12}

V_{12} [v]	14,2	11	7	3,5	
I [A]	4	3	2	1	
R_1 [Ω]	3,55	3,66	3,5	3,5	$R_{1moy}=3,55$

Tableau 2 : Mesure de la résistance statorique phase V_{12}

W_{12} [v]	14,2	11	7	3,7	
I [A]	4	3	2	1	
R_1 [Ω]	3,55	3,66	3,5	3,7	$R_{1moy}=3,6$

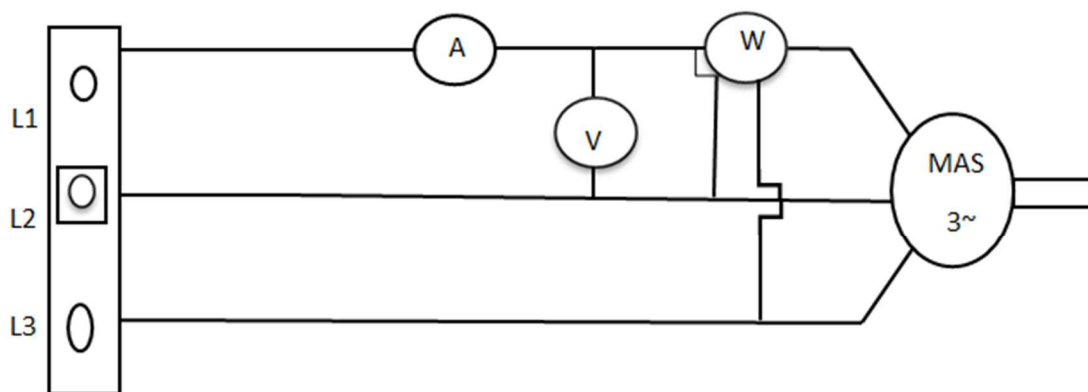
Tableau 3 : Mesure de la résistance statorique phase W_{12}

En faisant la moyenne, on trouve la résistance statorique relative à une phase

$$R_s=3,58 \ \Omega.$$

IV-2.2 Détermination de la résistance magnétisante et de la réactance magnétisante :

Pour mesurer la résistance de magnétisation qui représente les pertes fer et la réactance de magnétisation, on utilise l'essai à vide ou le moteur n'est pas couplé mécaniquement à aucune charge puis on fait varier la tension à une valeur d'environ 25% de la valeur nominale jusqu'à la tension nominale et on relève le courant et la puissance à vide ainsi que la vitesse de rotation.



Réseau

Triphasé

Figure(IV.2) : Schéma de câblage de l'essai à vide.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

U₀ [V]	100	260	320	380	430
I₀ [A]	0,48	0,9	1,15	1,56	2,5
P₀ [W]	94	184	233	320	430
P₀-3.R_s.I₀²	91,32	174,43	217,63	291,72	357,26

Tableau 4 : grandeurs de l'essai à vide.

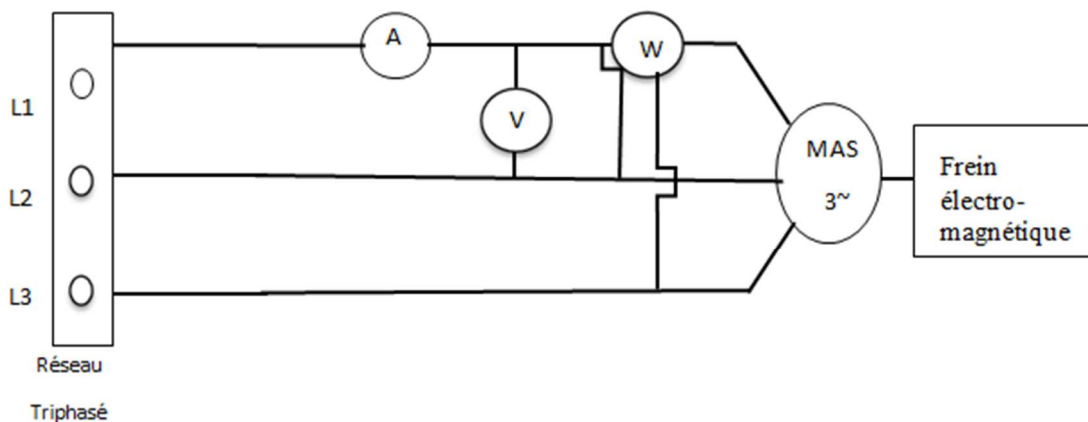
➤ **Détermination des pertes fer et mécanique :**

Ces deux pertes sont relevées à partir de l'essai à vide par la figure (II-4) du chapitre II :

$$P_{\text{fer}}=217,12 \text{ [W]} \text{ et } P_{\text{mec}}=74,6 \text{ [W]}$$

IV 2.3 Détermination des réactances de fuite et de la résistance ramenée au rotor :

Pour mesurer la réactance de fuite du stator et la résistance de fuite ramenée du rotor on doit passer par un essai à rotor bloqué pour le moteur à cage. Pour cela, on doit alimenter le moteur par une tension réduite de telle sorte que le courant sera égal au courant nominal, et on mesure le courant et la puissance absorbée.



Figure(IV.4) : Schéma du câblage de l'essai en charge

Les valeurs mesurées dans l'essai à rotor bloqué sont représentées dans les tableaux suivants :

Rotor bloqué couplage en Δ		
U_{cc} [V]	I_{cc} [A]	P_{cc} [W]
34	6,42	78
27,5	4,9	48
19,5	3,08	20
Rotor bloqué couplage en Y		
26	4,8	469

Tableau 5 : Essai à rotor bloqué couplage en triangle et en étoile

Des résultats expérimentaux tirés des essais à vide et en court-circuit, on calcule les paramètres électriques du moteur asynchrone.

Dans notre cas le rapport X_s/X_r' égale à 1 puisque il s'agit d'un moteur de faible puissance.

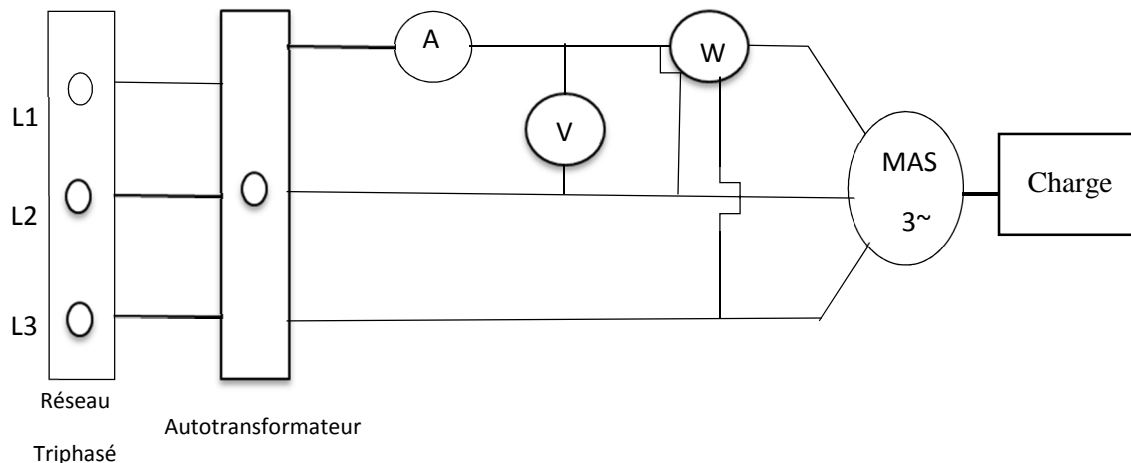
Ces résultats sont classés dans le tableau suivant :

Paramètres	X_m [Ω]	X_s [Ω]	X_r' [Ω]	R_m [Ω]	R_r' [Ω]	E_1 [V]
Valeurs	239.59	7.04	7.04	1867,9	3.20	367.67

Tableau 6 : Valeurs des paramètres du circuit électrique équivalent.

IV-2.4 Essai en charge :

Le schéma de câblage utilisé est donné par la figure suivante :



Figure(IV.4) : Schéma du câblage de l'essai en charge

Les résultats relatifs à l'essai en charge sont dans le tableau suivant [6]:

Grandeurs Essai	Courant [A] Δ	Température [°c]	Tension [V] Δ	Vitesse [Tr/min]	Couple [N.m]	Puissance [W]
50% I_n	4,05	60	371	2963	4,05	1950
A 80% I_n	6,5	89	371	2920	8,75	3600
A 90% I_n	7,3	102,5	375	2897	10,4	4320
100% I_n	8,1	108,2	378	2885	11,5	4740
Surcharge + 20% I_n	9,6	140	369	2880	13,5	5640

Tableau 7 : valeurs des grandeurs de l'essai en charge

Remarque :

La non disponibilité d'une charge qui tourne à la vitesse de 3000 Tr/min, on a en recours à l'essai en charge effectué par la promotion de 2004.

Les résultats de cet essai ont été tirés de la thèse ingénieur promotion 2004 « K. Sellam et S. Sedkaoui ».

IV-3 Courbe des puissances pratiques absorbée, transmise et utile en fonction du glissement :

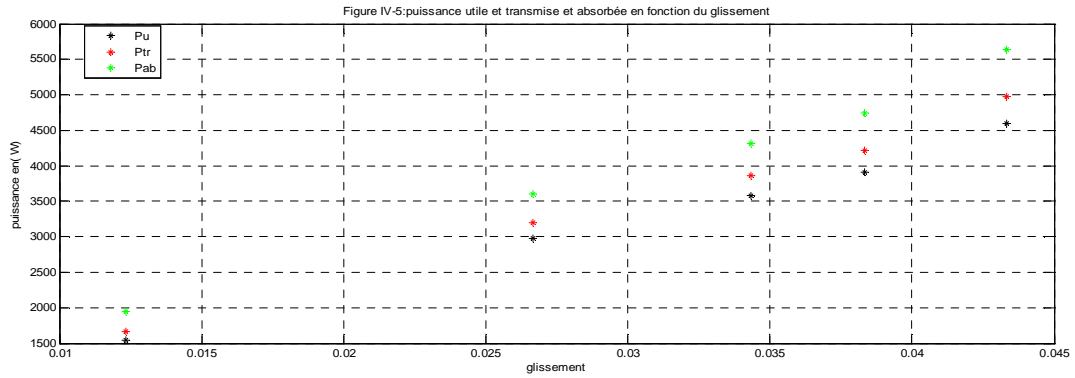


Figure (IV-5) : Puissances pratique absorbée, transmise et utile en fonction du glissement.

IV-4 Les courbes théorique (schéma électrique équivalent) et pratique :

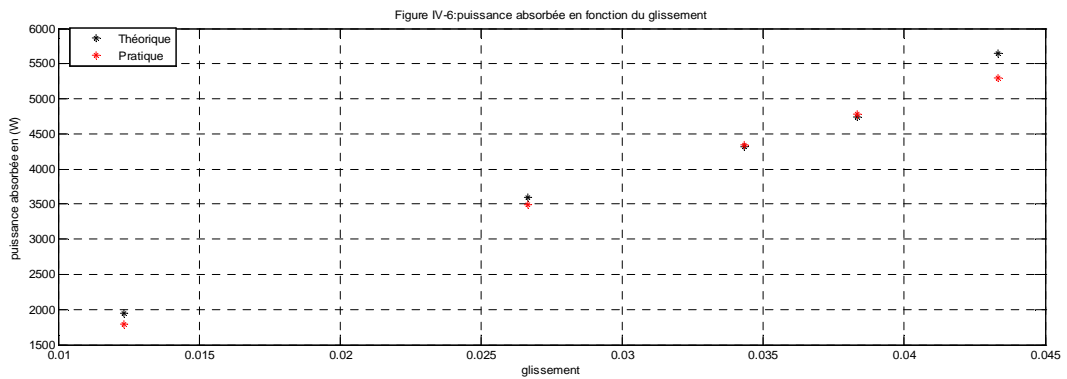


Figure (IV-6) : Puissance absorbée pratique et théorique en fonction du glissement

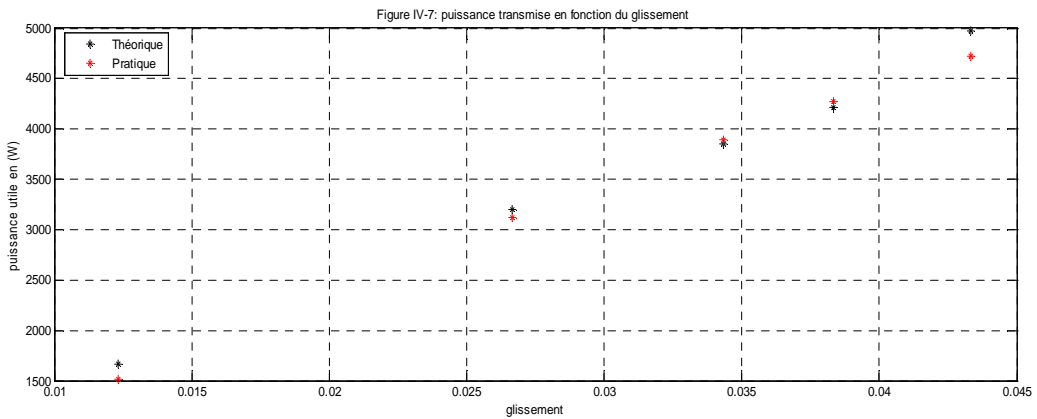


Figure (IV-7) : Puissance transmise pratique et théorique en fonction du glissement.

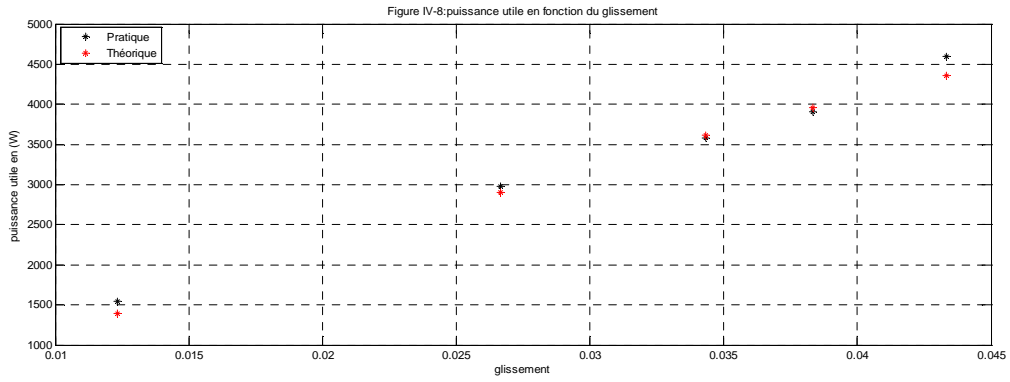


Figure (IV-8) : Puissance utile pratique et théorique en fonction du glissement.

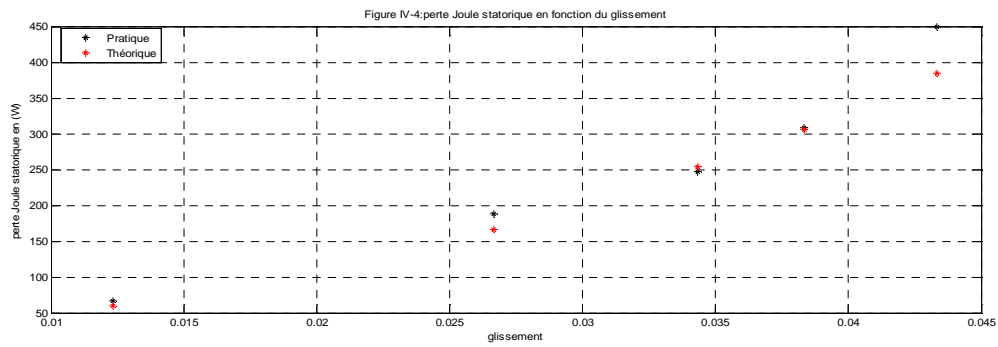


Figure (IV-9) : Pertes joules statorique pratique et théorique en fonction du glissement.

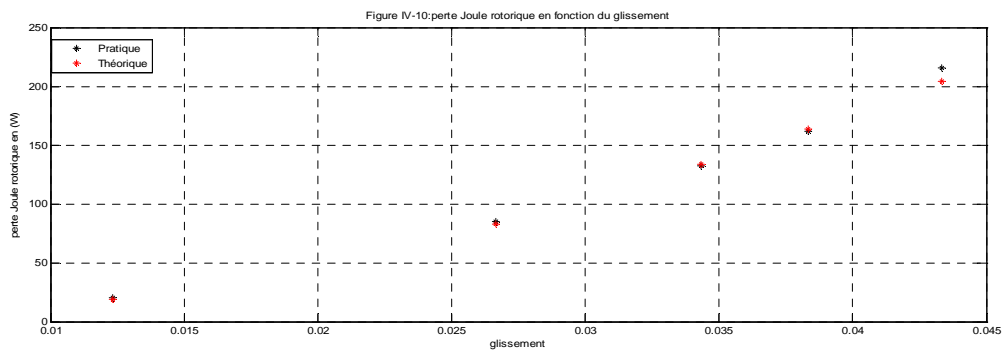


Figure (IV-10) : Pertes joules rotorique pratique et théorique en fonction du glissement.

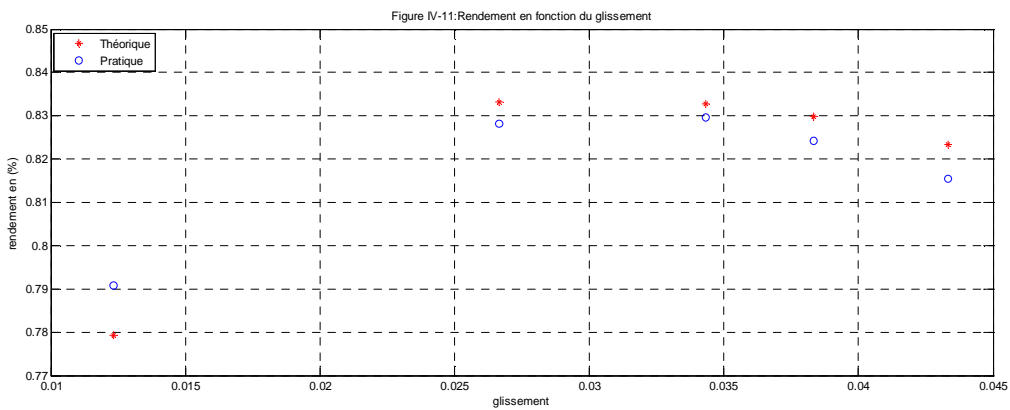


Figure (IV-11) : Rendement pratique et théorique en fonction du glissement.

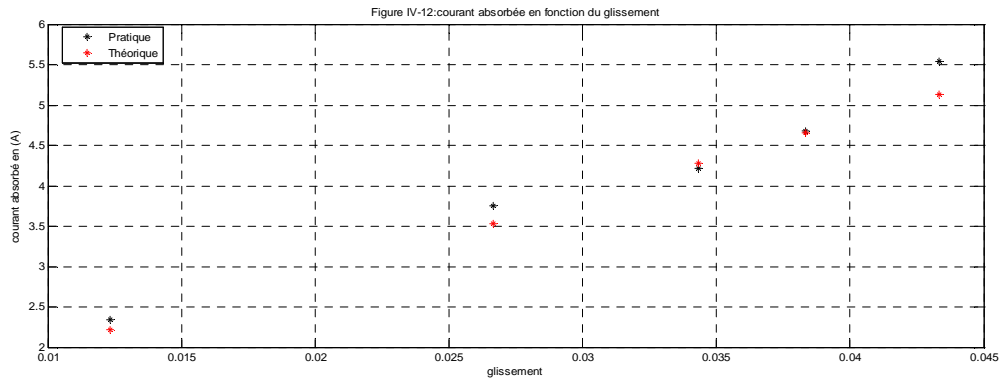


Figure (IV-12) courant absorbé pratique et théorique en fonction du glissement.

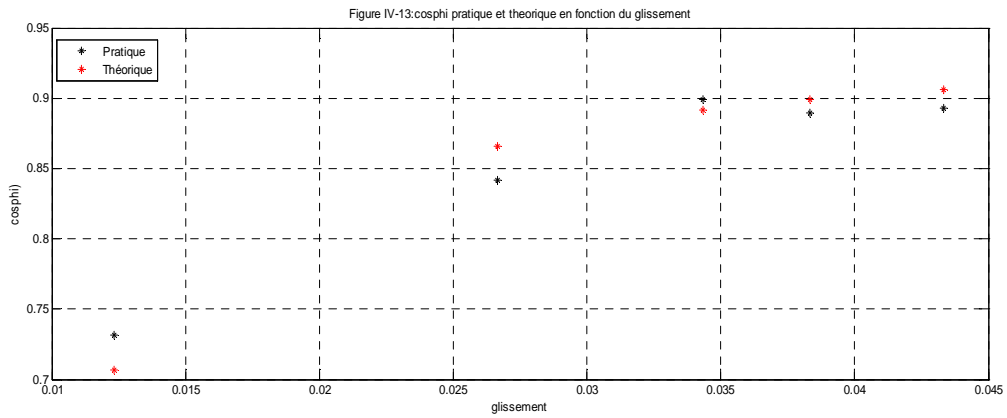


Figure (IV-13) : Facteur de puissance pratique et théorique en fonction du glissement.

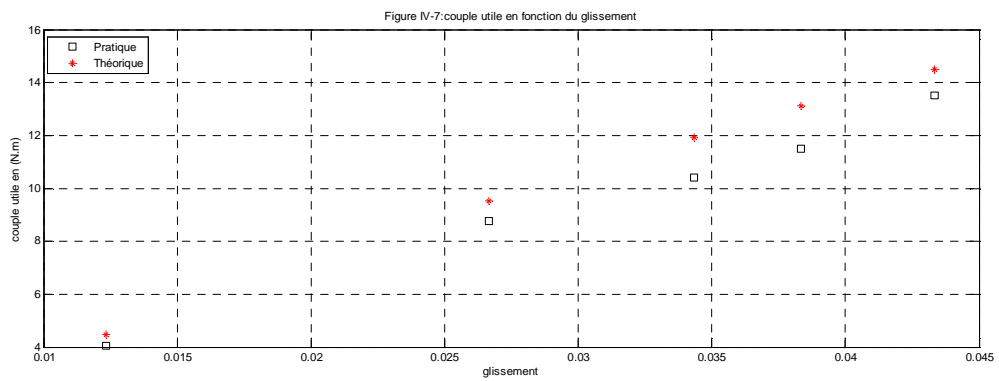


Figure (IV-14) : Couple utile pratique et théorique en fonction du glissement.

IV-5 Interprétation des courbes :

En comparant les courbes théoriques et expérimentales par rapport au glissement nominal, on trouve que toutes les courbes sont proches du point de fonctionnement nominal.

Donc on peut dire que les trois méthodes donnent de bons résultats pour le point de fonctionnement nominal de la machine.

Pour les valeurs du glissement inférieur au glissement nominal les courbes théoriques sont proches de celles pratiquées et augmentent linéairement avec le glissement.

Quand on s'éloigne du glissement nominal l'écart entre la courbe théorique et les points expérimentaux augmente. La courbe des points expérimentaux augmente avec une faible pente et tend à prendre des valeurs fixes. Tandis que, la courbe théorique (circuit électrique équivalent) continue d'augmenter. On peut expliquer ça par les phénomènes qui apparaissent sur la machine comme l'effet de peau, et l'effet de la saturation qui font varier les paramètres électriques du moteur en fonction de la charge. Pour les méthodes théoriques, les paramètres électriques sont considérés constants, ce qui a influencé sur les résultats.

IV-6 Conclusion :

Les résultats de calculs des différentes pertes et puissances électriques obtenues par les trois méthodes sont très proches, mais toutefois l'étude des performances nous montre que les paramètres électriques obtenus par la méthode expérimentale sont très proches au cas réel et plus précis.

La variation des paramètres électriques en fonction de la charge perturbe les performances de la machine. Les résultats obtenus par les deux méthodes théoriques sont précis, mais au-delà du fonctionnement nominal les résultats donnés s'avèrent imprécis.

Cela peut être expliqué par les phénomènes de saturation, et de l'effet de peau. Donc il est plus utile d'utiliser d'autres méthodes qui prouvent leurs efficacités de précision tout en tenant compte des lacunes présentées par la méthode de circuit équivalent.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le contenu de notre travail porte sur le calcul des pertes dans une machine asynchrone à cage de 4kW par différentes méthodes : méthode de dimensionnement, circuit électrique équivalent et les tests expérimentaux.

Les résultats de calcul trouvés avec les deux méthodes théoriques sont très proches. La comparaison des résultats de calculs des deux méthodes théoriques avec les essais expérimentaux nous laisse deviner que la méthode de dimensionnement au point nominal est plus précise puisqu'elle est très proche des essais expérimentaux.

La méthode du circuit électrique équivalent ne prend pas compte de la variation des paramètres électriques. Les paramètres électriques changent et varient suivant plusieurs phénomènes tel que : l'effet de peau, l'effet de saturation dans la machine.

Enfin, il est à noter que les paramètres électriques obtenus du circuit électrique équivalent sont acceptables et exploitables au régime de fonctionnement nominal de la machine. Cependant, pour une meilleure précision et compte tenu de toutes variations éventuelles causées par différents phénomènes fluctuant sur la machine, il est primordial de faire appel à d'autres méthodes garantissant plus de précisions et de performances tel que la méthode fréquentielle et la méthode des éléments finis.

La différence constatée en ce qui concerne les pertes calculées et leurs répartitions par les trois méthodes est dû au fait que chaque méthode utilise ses propres paramètres.

Méthode de dimensionnement fait recours aux grandeurs géométriques et électriques données par le constructeur.

Méthode de circuit équivalent se basent sur les paramètres calculés par différents essais.

Méthode expérimentale utilise les valeurs mesurées au cours des tests expérimentaux.

Bibliographie

Bibliographie

[1] R.PERRET « Entraînement électrique 2 » Edition Lavoisier 2007.

[2] N. Arkab, Y. Bouzidi, F. Mehoudi « Identification des paramètres d'une machine asynchrone à rotor bobiné »

Mémoire DEUA, UMMTO 2007.

[3] Théodore WILDI « Electrotechnique 4^{eme} édition » Année 2007.

[4] MAX MARTY « Principe d'électrotechnique » Edition DUNOD paris 2005.

[5] Techniques de l'Ingénieur « Pertes dans les machines tournantes » paris 1989.

[6] K. SELLAM, S. SEDKAOUI « contribution à l'étude expérimentale de l'échauffement d'un moteur asynchrone de 4KW » mémoire d'ingénieur promotion 2004.

[7] A. LOUNI, M. ALLOUCHENE « Identification des paramètres électriques de la machine asynchrone à cage » mémoire master promeniens 2012.

[8] S. Zourdani, K. Akoussi « Détermination de la répartition des pertes de puissance dans un moteur asynchrone ».

Mémoire License professionnelle, UMMTO 2011.

Annexes

Calcul du courant de ligne dans le stator :

$$I_1 = \frac{P_{un} \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_n \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi} = \frac{4 \cdot 10^3}{3 \cdot 380 \cdot 0,83 \cdot 0,88}$$

$$I_1 = 4,8 \text{ [A]}$$

Calcul de K_{enr1} :

$$K_{enr1} = K_{d1} \cdot K_{r1} = 0,95 \cdot 1 = 0,95$$

$$K_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2} \cdot q_1\right)} = \frac{\sin\left(\frac{1,04}{2}\right)}{4 \cdot \sin\left(\frac{1,04}{2} \cdot 4\right)} = 0,95$$

$$\alpha = \frac{2 \cdot \pi \cdot P \cdot q_1}{Z_1} = \frac{(2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 4)}{24} = 1,04 \text{ rd}$$

$$\alpha = 59,61^\circ$$

$$q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot P \cdot m_1} = \frac{24}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 4 \text{ enc/pôle/phase}$$

$$K_{r1} = \sin\left(\beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 1$$

$$\beta = \frac{Y_1}{\tau} = \frac{12}{12} = 1$$

Calcul du pas polaire

$$\tau = \pi \cdot \frac{D_{1int}}{2 \cdot P} = \pi \cdot \frac{92,7}{2} = 145,53 \text{ [mm]}$$

$$\tau = \frac{Z_1}{2 \cdot P} = \frac{24}{2} = 12 \text{ encoches}$$

Avec:

γ : Zone phasique.

Z_1 : Nombre d'encoche du stator.

q_1 : Nombre d'encoche par pôle et par phase.

K_{r1} : Coefficient de raccourcissement.

β : Pas de raccourcissement.

Y_1 : Pas d'enroulement.

τ : Pas polaire.

Calcul du nombre de spires W_1 :

$$W_1 = \frac{U_{en1} \cdot Z_1}{2 \cdot a_1 \cdot m_1} = \frac{64,24}{2 \cdot 1,3} = 256$$

$$W_1 = 256 \text{ spires}$$

Avec :

a_1 : nombre de branches parallèles.

U_{en1} : Nombre des conducteurs par encoche.

a_1 : Nombre de voix parallèles.

Calcul de l'induction d'entrefer B_δ :

$$B_\delta = \frac{0,225 \cdot 2 \cdot P \cdot U_\Delta \cdot 10^6}{l_i \cdot D_{1int} \cdot W_1} = \frac{0,225 \cdot 2 \cdot 1,380 \cdot 10^6}{100,92 \cdot 7,256} = 0,72 \text{ [T]}$$

Avec :

U_Δ : Tension simple nominale statorique.

l_i : Longueur de l'induit.

D_{1int} : Diamètre intérieur statorique.

Calcul de l'induction de la dent statorique :

$$B_{Z1max} = \frac{(t_1 \cdot B_\delta)}{K_{fer} \cdot b_{z1}} = \frac{(12,13 \cdot 0,72)}{0,98 \cdot 6,17} = 1,44 \text{ [T]}$$

$$B_{Z1max} = 1,44 \text{ [T]}$$

Avec :

K_{fer} : Coefficient de remplissage des tôles statorique.

$$K_{fer} = 0,985 - 5 \cdot P \cdot 10^{-3} = 0,985 - 5 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 0,98$$

b_{z1} : Largeur de la dent statorique.

Calcul du pas dentaire t_1 :

$$t_1 = \frac{(\pi \cdot D_{1int})}{Z_1} = \frac{(3,14 \cdot 92,7)}{24} = 12,13 \text{ [mm]}$$

$$t_1 = 12,13 \text{ [mm]}$$

Calcul de l'induction

$$B_{c1} = \frac{0,5 \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot h_{c1}} = \frac{0,5 \cdot 0,63 \cdot 145,53 \cdot 0,72}{0,98 \cdot 25,1}$$

$$B_{c1} = 1,359 \text{ [T]}$$

$$h_{c1} = 25,1 \text{ [mm]}$$

Avec :

α_i : Coefficient de recouvrement polaire, il est donné par la formule suivante :

$$\alpha_i = \frac{2}{\pi} = 0,63$$

Calcul de résistance statorique R_1 :

$$L_{f1} = [(1,16+0,14 \cdot P) \cdot b_{1moy}] + 15 = [(1,16+0,14 \cdot 1) \cdot 139,8] + 15$$

$$L_{f1} = 196,16 \text{ [mm]}$$

$$L_{W1} = 2 \cdot (l_i + L_{f1}) = 2 \cdot (100 + 196,16)$$

$$L_{W1} = 592,33 \text{ [mm]}$$

$$R_1 = \rho_{cu} \cdot \frac{L_{W1} \cdot W_1 \cdot 10^3}{a_1 \cdot N_{el} \cdot S_{eff}} = 24,4 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{592,33 \cdot 256 \cdot 10^3}{1 \cdot 1 \cdot 0,7}$$

$$R_1 = 5,29 \text{ [\Omega]}$$

Avec:

$$\rho_{cu} = 24,4 \cdot 10^{-9} \text{ [\Omega.m]} \text{ c'est la résistivité du cuivre à la température de } 115^\circ\text{C.}$$

Calcul du diamètre moyen b_{1moy} :

$$b_{1moy} = \frac{[\pi(D_{1int} + h_{z1}) \cdot Y_{1moy}]}{Z_1} = \frac{[\pi(92,7 + 13,76) \cdot 10]}{24}$$

$$b_{1moy} = 139,35 \text{ [mm]}$$

Calcul du courant rotorique I_2 :

$$I_2 = \frac{K_i \cdot 2 \cdot m_1 \cdot I_1 \cdot W_1 \cdot K_{enr1}}{Z_2} = \frac{0,9 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4,8 \cdot 256 \cdot 0,98}{20}$$

$$I_2 = 325,41 \text{ [A]}$$

D'après l'abaque :

$$K_i=0,9 \quad K_{enr1}=0,98$$

Calcul du pas dentaire t_2 :

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_{2ext}}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 92}{20}$$

$$t_2 = 14,44 \text{ [mm]}$$

Calcul de l'induction de l'encoche rotorique :

$$B_{z2max} = \frac{B_\delta \cdot t_2}{b_{z2} \cdot K_{fer}} = \frac{0,72 \cdot 14,44}{6,5 \cdot 0,98} = 1,64 \text{ [T]}$$

Avec :

$$b_{z2} = 6,5 \text{ [mm]}.$$

D_{2ext} : Diamètre extérieur du rotor en [mm].

Z_2 : Nombre d'encoche du rotor.

t_2 : Largeur de la dent rotorique en [mm].

K_{fer} : Coefficient de remplissage des tôles rotorique.

Calcul de la résistance de la barre rotorique :

On a la section de la barre $S_b = 68,05 \text{ [mm}^2\text{]}$

$$R_b = \rho_{al} \cdot \frac{l_i}{S_b} \cdot 10^3 = 48,8 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{100}{68,05} \cdot 10^3$$

$$R_b = 7,17 \cdot 10^{-5} \text{ [\Omega]}$$

Avec :

ρ_{al} : La résistivité de l'aluminium à 115°C égale à $48,8 \cdot 10^{-9} \text{ [\Omega.m]}$

$h_{c2} = 10,51 \text{ [mm]}$.

Calcul de la résistance de l'anneau S_{an} :

$$S_{an} = \frac{0,35 \cdot Z_2 \cdot S_b}{2P} = \frac{0,35 \cdot 20 \cdot 68,06}{2}$$

$$S_{an} = 238,17 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$h_{an} = 1,13 \cdot h_{z2} = 1,13 \cdot 18,4$$

$$h_{an} = 20,79 \text{ [mm]}$$

Calcul du diamètre de l'anneau D_{an} :

$$D_{an} = D_{2ext} - h_{an} = 90 - 20,79$$

$$D_{an} = 69,21 \text{ [mm]}$$

Calcul de la résistance de l'anneau R_{an} :

$$R_{an} = \frac{\rho_{al} \cdot 2\pi \cdot D_{an} \cdot 10^3}{Z_2 \cdot S_{an}} = \frac{48,8 \cdot 10^{-9} \cdot 2\pi \cdot 69,21 \cdot 10^3}{20 \cdot 238,17}$$

$$R_{an} = 4,45 \cdot 10^{-6} \text{ [\Omega]}$$

Avec :

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

h_{an} : Hauteur de l'anneau en [mm].

h_{z2} : Hauteur de l'encoche rotorique en [mm].

S_{an} : Section de l'anneau en [mm].

S_b : Section de la barre rotorique en [mm].

Calcul de la résistance de l'anneau ramenée à la barre :

$$R'_{an} = \frac{R_{an}}{\Delta^2}$$

$$\Delta = 2 \sin\left(\frac{\pi \cdot P}{Z_2}\right) = 2 \sin\left(\frac{\pi \cdot P}{20}\right) = 0,312$$

$$R'_{an} = \frac{4,4 \cdot 10^{-6}}{0,312^2} = 4,55 \cdot 10^{-5} \text{ [\Omega]}$$

Calcul de la résistance rotorique R_2 :

$$R_2 = R'_{an} + R_b = 4,55 \cdot 10^{-5} + 7,17 \cdot 10^{-5}$$

$$R_2 = 11,72 \cdot 10^{-5} [\Omega]$$

$$\alpha_{ob} = 10^\circ = 0,174 \text{ [rad]}$$

$$K_{ob} = \frac{[\sin(\frac{\alpha_{ob}}{2})]}{\frac{\alpha_{ob}}{2}} = \frac{[\sin(0,174/2)]}{0,174/2} = 0,99$$

$$M = \frac{4m_1 \cdot (W_1 \cdot K_{enr})^2}{Z_2 \cdot K_{ob}^2}$$

$$M = \frac{4 \cdot 3 \cdot (256 \cdot 0,95)^2}{20 \cdot 0,99^2} = 36208,88$$

$$R'_2 = M \cdot R_2 = 36208,88 \cdot 11,72 \cdot 10^{-5}$$

$$R'_2 = 4,24 \text{ } [\Omega]$$

Avec :

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

K_{ob} : Coefficient d'obliquité des encoches rotorique.

α_{ob} : Angle d'inclinaison des encoches rotorique.

Calcul des pertes et du rendement d'une machine asynchrone à cage.

I- Les pertes électriques :

I-1-Pertes joules statorique :

$$P_{js} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2$$

$$P_{js} = 3 \cdot 3,72 \cdot (4,8)^2$$

$$P_{js} = 365,93W$$

I-2 pertes joule rotorique :

$$P_{jr} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2$$

$$P_{jr} = 20 \cdot 11,72 \cdot 10^{-5} \cdot (325,41)^2$$

$$P_{jr} = 248,25[W]$$

II-Les pertes mécaniques :

On a :

Pour $2P=2$ on a $N_s=3000[\text{tr}/\text{min}]$

$$K_t = 1$$

$$P_{mec} = K_t \cdot (N_s / 10)^2 \cdot (D_{1ext} \cdot 10^{-3})^4$$

$$P_{mec} = 1 \cdot (3000 / 10)^2 \cdot (170 \cdot 10^{-3})^4$$

$$P_{mec} = 75,16[\text{W}]$$

III-Pertes magnétique dans l'acier :

III-1-Les pertes magnétiques principales :

III-1-a-Les pertes dans la culasse statorique :

On a:

$$P_{10(50\text{hz})} = 2,5[\text{W} / \text{Kg}]$$

$$K_{dc} = 1,7$$

$$\rho_c = 7,8 \cdot 10^3 [\text{Kg} / \text{m}^3]$$

$$G_{c1} = \pi [D_{1ext} - h_{c1}] K_{fer} \cdot l_i \cdot h_{c1} \cdot \rho_c \cdot 10^{-9}$$

$$G_{c1} = 3,14 [170 - 25,1] \cdot 0,98 \cdot 100 \cdot 25,1 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \cdot 10^{-9}$$

$$G_{c1} = 8,72[\text{Kg}]$$

$$P_{c1} = P_{10(50\text{hz})} \cdot (f_1 / 50)^\beta \cdot K_{dc} \cdot G_{c1} \cdot B_{c1\text{max}}^2$$

$$P_{c1} = 2,5 \cdot (50 / 50)^{3/2} \cdot 1,7 \cdot 8,72 \cdot (1,34)^2$$

$$P_{c1} = 68,56[\text{W}]$$

III-1-b-Les pertes dans les dents statorique :

On a:

$$K_{dz} = 1,8$$

$$G_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot Z_1 \cdot K_{fer} \cdot l_i \cdot \rho_c \cdot 10^{-9}$$

$$G_{z1} = 13,76 \cdot 6,17 \cdot 24 \cdot 0,98 \cdot 100 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \cdot 10^{-9}$$

$$G_{z1} = 1,56 [\text{Kg}]$$

$$P_{fz1} = K_{dz} \cdot B_{z1\text{max}}^2 \cdot G_{z1} \cdot P_{10(50\text{hz})} \cdot (f_1 / 50)^\beta$$

$$P_{fz1} = 1,8 \cdot (1,44)^2 \cdot 1,29 \cdot 2,5 \cdot (50/50)^{3/2}$$

$$P_{fz1} = 14,65 [W]$$

III-1-c-Pertes magnétique principale d'acier :

$$P_{acp} = P_{fc1} + P_{fz1}$$

$$P_{acp} = 68,56 + 14,65$$

$$P_{acp} = 83,21 [W]$$

III-1-d-Pertes magnétiques supplémentaire d'acier :

III-1-d-1-Pertes à la surface du rotor (pertes superficielles) :

$$P_{ac\ sup} = P_{sr} + P_{pul2}$$

On a d'après les abaques voire annexe (3) :

$$\beta_{02} = 0,13 \quad K_{\delta} = 1,25$$

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

$$K_{\delta1} = 1 + \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_1}{b_{f1}}} = 1 + \frac{4,37}{12,13 - 4,37 + \frac{5,0,7,12,13}{4,37}} = 1,25$$

$$K_{\delta1} = 1,25.$$

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_{2ext}}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 92}{20} = 14,44 [mm].$$

$$K_{\delta2} = 1 + \frac{b_{f2}}{t_2 - b_{f2} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{f2}}} = 1 + \frac{0}{14,44 - 0 + \frac{5,0,7,14,44}{0}} = 1$$

$$K_{\delta2} = 1$$

$b_{f2} = 0$; les encoches statoriques sont fermés.

δ : Epaisseur de l'entrefer en [mm].

$$K_{\delta} = K_{\delta1} \cdot K_{\delta2} = 1,25$$

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot K_{\delta} \cdot B_{\delta}$$

$$B_{02} = 0,13 \cdot 1,25 \cdot 0,72$$

$$B_{02} = 0,12 [T]$$

$K_{02} = 0,98$ (coefficient déterminé par l'abaque représentant K_{02} en fonction du diamètre extérieur).

$$P_{sr2} = 0,5 \cdot K_{02} \cdot (Z_1 \cdot N_s / 10^4)^{\beta} \cdot (B_{02} \cdot t_1)^2$$

$$P_{sr2} = 0,5 \cdot 0,98 \cdot (24 \cdot 3000 / 10^4)^{3/2} \cdot (0,12 \cdot 12,13)^2$$

$$P_{sr2} = 22,16 [W]$$

$$P_{sr} = P_{sr2} \cdot (t_2 \cdot b_{f2}) \cdot l_i \cdot Z_2 \cdot 10^{-6}$$

$$P_{sr} = 19,96.(14,44.0).100.20.10^{-6}$$

$$P_{sr} = 0[W]$$

III-1-d-2-Pertes par harmonique du flux dans les dents :

$$\gamma_1 = (b_{f1} / \delta)^2 / (5 + b_{f1} / \delta)$$

$$\gamma_1 = (4,37 / 0,35)^2 / (5 + 4,37 / 0,35)$$

$$\gamma_1 = 5,82$$

$$B_{pul2} = (\gamma_1 \cdot \delta \cdot B_{z1max}) / (2 \cdot t_2)$$

$$B_{pul2} = (2,91.0,35.1,44) / (2.14,44)$$

$$B_{pul2} = 0,115[W]$$

$$G_{z2} = Z_2 \cdot h_{c2} \cdot b_{z2} \cdot l_i \cdot K_{fer} \cdot \gamma_c \cdot 10^{-9}$$

$$G_{z2} = 20.10,51.6,5.100.0,98.7,8.10^3.10^{-9}$$

$$G_{z2} = 1,04[Kg]$$

G_{z2} : poids total des dents statoriques en [Kg]

$$P_{pul2} = 0,11 \cdot [(Z_1 \cdot N_s / 10^3) \cdot B_{pul2}]^2 \cdot G_{z2}$$

$$P_{pul2} = 0,11 \cdot [(20.3000 / 10^3) \cdot 0,115]^2 \cdot 1,04$$

$$P_{pul2} = 7,914[W]$$

III-1-d-3-Pertes magnétique supplémentaire dans l'acier :

$$P_{acsup} = 0 + 7,914$$

$$P_{acsup} = 7,914 [W]$$

III-1-e-Les pertes totales dans l'acier :

$$P_{ac\Sigma} = P_{acp} + P_{acsup}$$

$$P_{ac\Sigma} = 83,08 + 7,914$$

$$P_{ac\Sigma} = 91,001[W]$$

VI-Calcul des pertes supplémentaires :

$$P_{sup} = 0,005 \cdot (P_{inon} \cdot 10^3) / \eta_n$$

$$P_{sup} = 0,005 \cdot (4.10^3) / 0,83$$

$$P_{sup} = 24,1 [W]$$

V-Calcul des pertes totales de la machine :

$$P_{Tot} = P_{js} + P_{jr} + P_{mec} + P_{ac\Sigma} + P_{sup} = 365,93 + 248,25 + 75,16 + 89,35 + 24,1$$

$$P_{Tot} = 804,45[W]$$

IV-Calcul de la puissance absorbée :

$$P_{ab} = P_u + P_{tot} = 4000 + 804,45$$

$$P_{ab} = 4804,45 [W]$$

III-Le rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_{tot}} = \frac{4000}{4000 + 804,45}$$

$$\eta = 0,83$$

Calcul du nombre de conducteurs dans les encoches par phase :

$$n = Z_1 \cdot U_{enr1} = 8.64$$

$$n = 512 \text{ conducteurs}$$

Avec : Z_1 : Nombre d'encoches par phase statorique.

U_{enr1} : Nombre de conducteurs par encoche statorique.

Calcul de la longueur totale du conducteur dans les encoches par phase :

$$l = l_i \cdot n$$

$$l = 51200 \text{ [mm]}$$

$$l = 51,2 \text{ [m]}$$

Calcul de la résistance totale du conducteur dans la partie d'encoche d'une phase :

$$R_{enc} = \rho_{110} \cdot \frac{l}{S} = 24,4 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{51,2}{0,396 \cdot 10^{-6}}$$

$$R_{enc} = 3,15 [\Omega]$$

Avec :

S : section du conducteur nu [m²]

Calcul de la résistance des têtes de bobine par phase :

$$R_{tb} = \frac{R_1 - R_{enc}}{2} = \frac{3,75 - 3,15}{2}$$

$$R_{tb} = 0,59 [\Omega]$$

Calcul de la résistance de la tête de bobine par phase du coté non ventilé :

$$R_{tbnv} = R_{tb(110)} \cdot \frac{T_2 + K}{T_1 + K}$$

$$R_{tbnv} = 0,8 [\Omega]$$

Avec : $T_1 = 110^\circ\text{C}$ et $T_2 = 108,2^\circ\text{C}$

Calcul de la résistance de la tête de bobine par phase du coté ventilé :

$$R_{tbv} = R_{tb(115^\circ\text{C})} \cdot \frac{T_V + K}{T_1 + K}$$

$$R_{tbv} = 0,79 [\Omega]$$

Avec : $T_1=110^\circ\text{C}$

$$T_v=102,2^\circ\text{C}$$

➤ **Répartition des pertes joules statoriques :**

A/ Méthode de dimensionnement :

- **Calcul des pertes joules statoriques dans la partie d'encoche :**

$$P_{jsenc} = 3 \cdot R_{enc} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 3,15 \cdot 4,8^2$$

$$P_{jsenc} = 217,72 \text{ [W]}$$

- **Calcul des pertes joules dans les têtes de bobines du côté non ventilé :**

$$R_{tb} = \frac{R_1 - R_{enc}}{2} = \frac{5,29 - 3,15}{2} = 1,07 \text{ [\Omega]}$$

$$P_{jstbnv} = 3 \cdot R_{tbnv} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 1,07 \cdot 4,8^2$$

$$P_{jstbnv} = 73,95 \text{ [W]}$$

- **Calcul des pertes joules dans les têtes de bobines du côté ventilé :**

$$P_{jstbv} = 3 \cdot R_{tbv} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 1,07 \cdot 4,8^2$$

$$P_{jstbv} = 73,95 \text{ [W]}$$

Remarque : on suppose que la température est la même dans les deux côtés ventilé et non ventilé

B/ Méthode du circuit équivalent :

- **Pertes joules statorique dans les têtes de bobines côté ventilé :**

$$P_{jstbv} = m_1 \cdot R_{tbv} \cdot I_s^2 = 3 \cdot 0,79 \cdot 4,64^2$$

$$P_{jstbv} = 51,24 \text{ [W]}$$

- **Pertes joules statorique dans les têtes de bobines côté non ventilé :**

$$P_{jstbnv} = m_1 \cdot R_{tbnv} \cdot I_s^2 = 3 \cdot 0,84 \cdot 4,64^2$$

$$P_{jstbnv} = 51,89 \text{ [W]}$$

- **Pertes joules statorique dans la partie d'encoche :**

$$P_{jsenc} = P_{js} - (P_{jstbv} + P_{jstbnv}) = 306,66 - (51,24 + 51,89)$$

$$P_{jsenc} = 203,53 \text{ [W]}$$

C/ Méthode expérimentale :

- **Calcul des pertes joules statorique dans la partie d'encoche :**

$$P_{jsenc} = 3 \cdot R_{enc} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 3,15 \cdot 4,1^2$$

$$P_{jsenc} = 158,85 [W]$$

- **Calcul des pertes joules dans les têtes de bobines du coté non ventilé :**

$$P_{jstbnv} = 3 \cdot R_{tbnv} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 0,82 \cdot 4,1^2$$

$$P_{jstbnv} = 41,35 [W]$$

- **Calcul des pertes joules dans les têtes de bobines du coté ventilé :**

$$P_{jstbv} = 3 \cdot R_{tbv} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 0,82 \cdot 4,1^2$$

$$P_{jstbv} = 41,35 [W]$$

$$R_{1(115)} = R_{1(26)} \cdot \frac{115 + 235}{26 + 235}$$

$$R_{1(115)} = 4,8 [\Omega]$$

$$R_{tb} = \frac{R_{1(115)} - R_{enc}}{2}$$

$$R_{tb} = 0,82 [\Omega]$$

- **Répartition des pertes joules rotorique :**

A/ Méthode de dimensionnement :

- **Pertes joule rotorique dans la barre :**

$$P_{jrbar} = m_2 \cdot R_{bar} \cdot I_2^2 = 20,7 \cdot 17 \cdot 10^{-5} \cdot 325,41^2$$

$$P_{jrbar} = 151,84 [W]$$

- **Pertes joule rotorique dans l'anneau côté ventilé :**

$$P_{jsan} = m_2 \cdot \frac{R'_{an}}{2} \cdot I_2^2 = 20 \cdot (4,45 \cdot 10^{-6} / 2) \cdot 325,41^2$$

$$P_{jravn} = 24,06 [W]$$

- **Pertes joule rotorique dans l'anneau côté ventilé :**

- $P_{jsan} = m_2 \cdot \frac{R'_{an}}{2} \cdot I_2^2 = 20 \cdot (4,45 \cdot 10^{-6} / 2) \cdot 325,41^2$

$$P_{jrannv} = 24,06 [W]$$

B/ Méthode de circuit équivalent :

Calcul du volume total du circuit électrique:

$$V_{tot} = V_{ann} + V_{bar}$$

- **Calcul du volume des barres rotorique :**

$$V_{bar} = m_2 \cdot S_{bar} \cdot l = 20.68.100$$

$$V_{bar} = 136000 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Avec :

m_2 : nombres de barres rotoriques.

S_{bar} : Section de l'encoche rotorique en [mm²].

l : Longueur du rotor en [mm].

- **Calcul du volume d'un anneau de court-circuit :**

$$V_{an} = \frac{\pi \cdot (D_{ex} - D_{in})^2}{4} \cdot e = \frac{3,14 \cdot (90 - 50)^2 \cdot 20}{4}$$

$$V_{an} = 25133 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Avec :

$$V_{ann} = 2 * V_{an}$$

D_{ex} : Diamètre extérieur de l'anneau en [mm].

D_{in} : Diamètre intérieur de l'anneau en [mm].

e : L'épaisseur de l'anneau en [mm].

D'où : $V_{tot} = 186266 \text{ [mm}^3\text{]}$.

Avec : $P_{jr} = 163,95 \text{ [W]}$

$$P_{jrbar} = \frac{P_{jr} \cdot V_{bar}}{V_{tot}} = \frac{163,95 \cdot 136000}{186266}$$

$$P_{jrbar} = 119,7 \text{ [W]}$$

D'où les pertes joules dans les deux anneaux sont :

$$P_{jran} = P_{jr} - P_{jrbar} = 46,25 \text{ [W]}$$

Comme on a supposé que la température et la même dans les deux anneaux de court-circuit :

$$P_{janv} = 23,12 \text{ [W]}$$

$$P_{jannv} = 23,12 \text{ [W]}$$

C/ Méthode expérimentale :

$$P_{jr} = 161,53 \text{ [W]}$$

$$\begin{cases} P_{jr} \rightarrow V_{tot} \\ P_{jrbar} \rightarrow V_{bar} \end{cases} \rightarrow P_{jrbar} = \frac{P_{jr} \cdot V_{bar}}{V_{tot}} = \frac{161,53 \cdot 136000}{186266}$$

$$P_{jrbar} = 117,93 \text{ [W]}$$

D'où les pertes joules dans les deux anneaux sont :

$$P_{jran} = P_{jr} - P_{jrbar} = 43,7 \text{ [W]}$$

Comme on a supposé que la température est la même dans les deux anneaux de court-circuit :

$$P_{janv} = 21,85 \text{ [W]}$$

$$P_{annv} = 21,85 \text{ [W]}$$

➤ **Répartition des pertes fer :**

A/ Méthode dimensionnement :

▪ **Pertes fer dans la culasse statorique :**

$$P_{fercul} = 68,56 \text{ [W]}$$

▪ **Pertes dans les dents statorique :**

$$P_{ferdent} = 14,65 \text{ [W]}$$

Ces pertes sont calculé précédemment voire annexe 1.

B/ Méthode du circuit équivalent :

D'après les dimensions géométriques de la machine on trouve le volume total du fer statorique comme suit :

▪ **Calcul du volume total du fer statorique :**

$$V_{tot} = \left\{ \frac{\pi \cdot D_{1ext}^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_{1int}^2}{4} - 24 \cdot \left(\frac{\pi \cdot r^2}{2} + \frac{(b_{z1} + 2 \cdot r) \cdot h_{en1}}{2} \right) \right\} \cdot l$$

$$V_{tot} = 1363964 \text{ [mm}^3\text{]}$$

▪ **Calcul du volume de la culasse statorique :**

$$V_{cul} = \left\{ \frac{\pi \cdot D_{1ext}^2}{4} - \frac{\pi \cdot (D_{1int} + 2 \cdot h_{z1})^2}{4} \right\} \cdot l$$

$$V_{cul} = 1134700 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Avec :

r : Rayon de fond d'encoche statorique en [mm].

l : Longueur du stator en [mm].

b_{z1} : L'ouverture de l'encoche statorique en [mm].

$$P_{fer} = 196 \text{ [W]}$$

▪ **Calcul des pertes fer dans la culasse statorique :**

$$P_{fercul} = \frac{V_{cul} \cdot P_{fer}}{V_{tot}} = \frac{196 \cdot 1134700}{1363964}$$

$$P_{fercul} = 163 \text{ [W]}$$

▪ **Calcul des pertes fer dans les dents:**

$$P_{ferdent} = P_{fer} - P_{fercul} = 196 - 163$$

$$P_{ferdent} = 33 \text{ [W]}$$

C/ Méthode expérimentale :

▪ **Calcul des pertes fer dans la culasse statorique :**

$$\begin{cases} P_{fer} \rightarrow V_{tot} \\ P_{cul} \rightarrow V_{cul} \end{cases} \rightarrow P_{fercul} = \frac{P_{fer} \cdot V_{cul}}{V_{tot}} = \frac{196 \cdot 1134700}{1363964}$$

$$P_{fercul} = 163 \text{ [W]}$$

▪ **Calcul des pertes fer dans les dents statorique :**

$$P_{fer} = P_{fercul} + P_{ferdent} \quad \longrightarrow \quad P_{ferdent} = P_{fer} - P_{fercul} = 196 - 163$$

$$P_{ferdent} = 33 \text{ [W]}$$

B/ Méthode de circuit équivalent :

▪ **Calcul des pertes fer dans la culasse statorique :**

$$\begin{cases} P_{fer} \rightarrow V_{tot} \\ P_{cul} \rightarrow V_{cul} \end{cases} \rightarrow P_{fercul} = \frac{P_{fer} \cdot V_{cul}}{V_{tot}} = \frac{217,12 \cdot 1134700}{1363964}$$

$$P_{fercul} = 180,62 \text{ [W]}$$

▪ **Calcul des pertes fer dans les dents statorique :**

$$P_{fer} = P_{fercul} + P_{ferdent} \quad \longrightarrow \quad P_{ferdent} = P_{fer} - P_{fercul} = 196 - 163$$

$$P_{ferdent} = 36,5 \text{ [W]}$$

Les résultats trouvés des différentes pertes avec les trois méthodes au point de fonctionnement nominal.

I. Méthode de dimensionnement :

grandeurs	Pab[W]	Pu[W]	Pjs[W]	Pjr[W]	Pfer[W]	Psup[W]	Pmec[W]
résultats	4803,87	4000	365,93	248,25	91	24,09	75,16

Tableau 1 : Les différentes pertes avec la méthode de dimensionnement

II. Méthode de circuit équivalent :

grandeurs	Pab[W]	Pu[W]	Pjs[W]	Pjr[W]	Pfer[W]	Psup[W]	Pmec[W]
résultats	4776,5	4011,4	306,66	163,95	195,99	23,88	74,6

Tableau 2 : Les différentes pertes avec la méthode de circuit équivalent

III. Méthode expérimentale :

grandeurs	Pab[W]	Pu[W]	Pjs[W]	Pjr[W]	Pfer[W]	Psup[W]	Pmec[W]
résultats	4740	4000	310,66	161,46	217,12	23,7	74,6

Tableau 3 : Les différentes pertes avec la méthode expérimentale

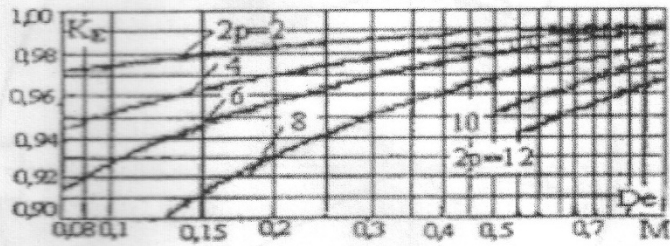


Fig. 1 : coefficient $K_e = f(D_e)$

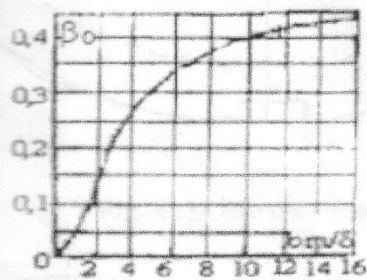


Fig. 2 : coefficient $\beta_{02} = f\left(\frac{b/\sqrt{\delta}}{\delta}\right)$

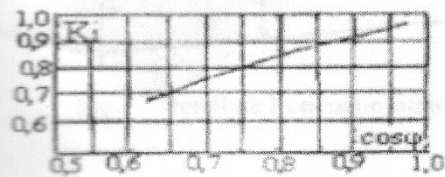
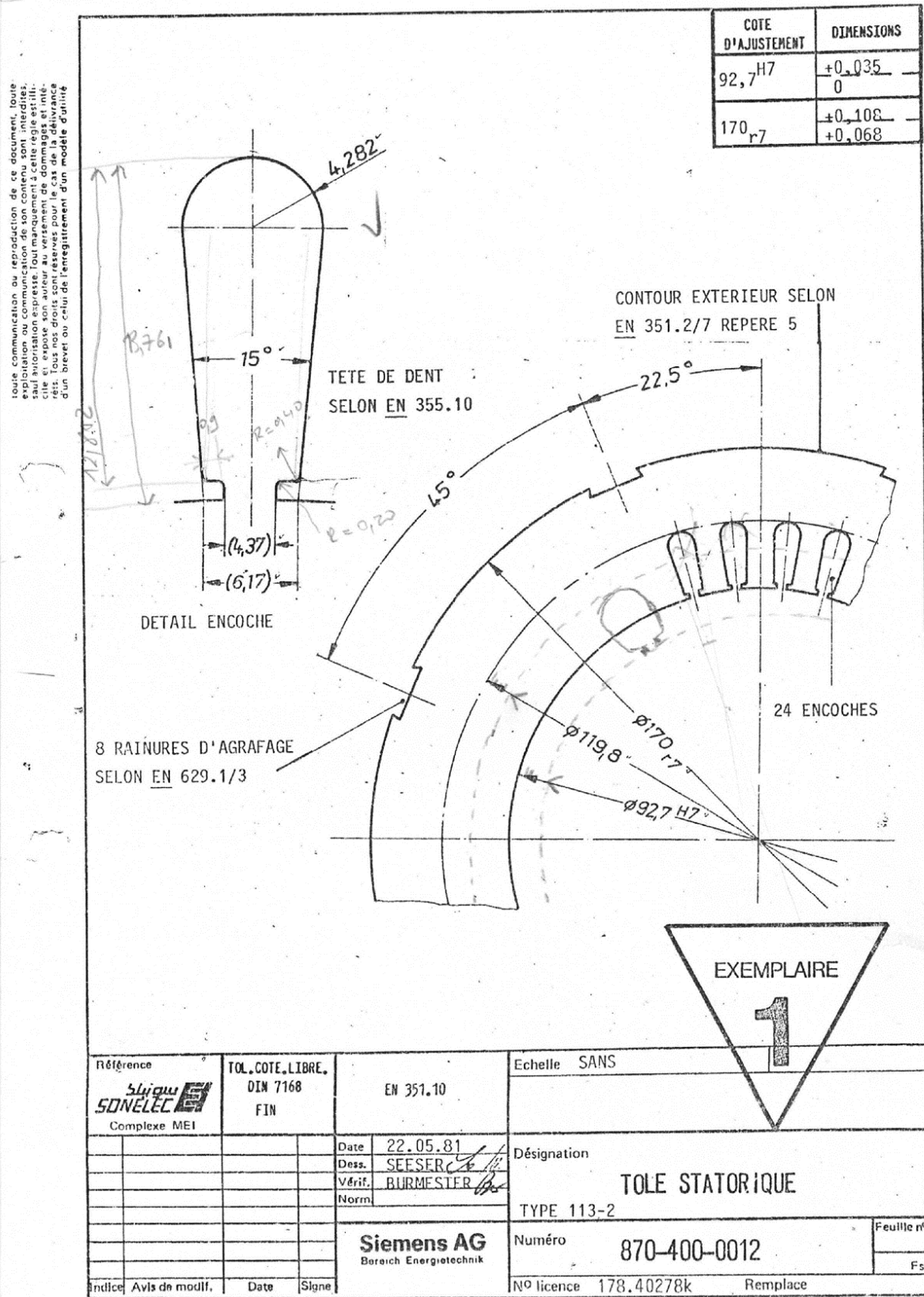


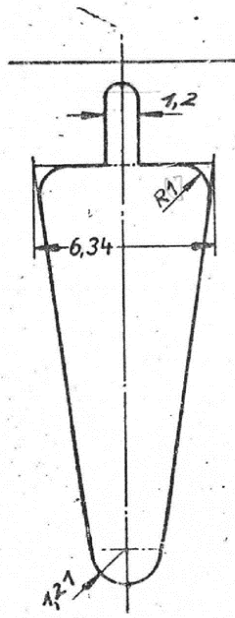
Fig.3 : Coefficient, $K_i = f(\cos \varphi)$

Figure : Abaques représentant différents coefficients

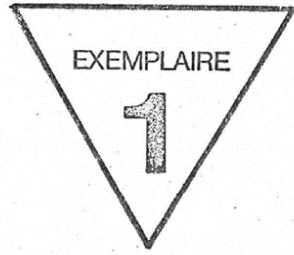


Toute communication ou reproduction de ce document, toute exploitation ou utilisation, sans autorisation écrite préalable de l'auteur, est formellement interdite. Toute réimpression, sans autorisation écrite préalable de l'auteur, est formellement interdite. Toute réimpression, sans autorisation écrite préalable de l'auteur, est formellement interdite. Toute réimpression, sans autorisation écrite préalable de l'auteur, est formellement interdite. Tous nos droits sont réservés pour le cas de la délivrance d'un brevet ou celui de l'enregistrement d'un modèle d'outil.

COTE D'AJUSTEMENT	DIMENSIONS
37 ^{H7}	+0,025 0

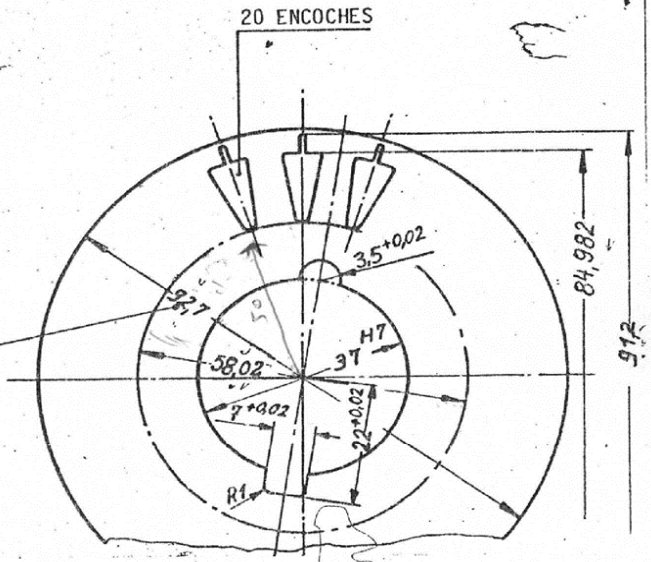


ENCOCHE D'EMPILAGE SELON EN 355.01/4



M 5:1

COTE DE DECOUPAGE



Référence		TOL. COTE. LIBRE.		Echelle 1:1 / 5:1	
 Complexe MEI		DIN 7168 FIN		EN 351.70	
		Date	25.05.81	Désignation TOLE ROTORIQUE TYPE 113-2	
		Doss.	SEESER		
		Vérif.	BURMESTER		
		Norm.			
		Siemens AG Bereich Elektrotechnik		Numéro 870-410-0012	Feuille n° Fs
Indice	Avis de modif.	Date	Signe	N° licence 113.40652m Remplace	

Plaque signalétique du moteur asynchrone à cage de 4kW :

Puissance utile $P_{un}=4kW$

Tension nominale en triangle $U_n=380V$

Courant nominal en triangle $I_n=8,1$

Vitesse de rotation $N=2895tr/min$

Facteur de puissance $\cos(\varphi)=0,88$

Fréquence $f_1=50hz$

Rendement nominal $\eta_n=0,83$

Résumé

Thème : Etude des pertes et leurs répartitions dans un moteur asynchrone à cage de 4Kw.

Le présent travail consiste à définir et calculer les différentes pertes ainsi que leurs répartitions dans un moteur asynchrone à cage de 4 Kw par trois méthodes :

- Méthode dimensionnement (géométrique).
- Méthode de circuit électrique équivalent.
- Méthode expérimentale.

La première méthode se base sur dimensions géométrique et la plaque signalétique.

La deuxième méthode en utilisant le schéma électrique équivalent en (T) ramené au primaire.

La troisième méthode se base sur les résultats expérimentaux effectués au laboratoire.

Vers la fin on a clôturé avec une conclusion.