

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU  
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



# ***Memoire***

*De fin d'études  
En vue de l'obtention du diplôme de Master académique  
en Electrotechnique  
Option machines électriques*

*Thème*

*Conception optimale d'un moteur asynchrone triphasé  
à cage d'écureuil à haut rendement (IE 2)*

*Dirigé par :*

*Mr. BELASSEL Mohand-Tahar.*

*Proposé par:*

*Mr. BENTAHA Djilali*

*Réalisé par :*

*Mr. Chaïb Mokrane.*

*Mr. Rahab Tarik.*

*Promotion 2010/2011*

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU  
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



# ***Memoire***

*De fin d'études  
En vue de l'obtention du diplôme de Master académique  
en Electrotechnique  
Option machines électriques*

*Thème*

*Conception optimale d'un moteur asynchrone triphasé  
à cage d'écureuil à haut rendement (IE 2)*

*Dirigé par :*

*Mr. BELASSEL Mohand-Tahar.*

*Proposé par:*

*Mr. BENTAHA Djilali*

*Réalisé par :*

*Mr. Chaïb Mokrane.*

*Mr. Rahab Tarik.*

*Promotion 2010/2011*

## Remerciements

*À travers ce modeste travail, nous tenons à remercier « dieu » le tout puissant de nous avoir donné la santé et le courage d'effectuer ce projet de fin d'étude dans les meilleures conditions.*

*Nos remerciements s'adressent à :*

*Mr Belassel M-T, notre promoteur qui nous a encadré et pour ses précieux conseils et orientations, ainsi que la confiance qu'il a placé en nous tout au long de la préparation de ce projet.*

*Mr Bentaha DJ, notre co-promoteur, pour son aide, sa tolérance et ses conseils pendant notre stage, et aussi à tout le personnel de l'électro-industries-Azazga.*

*Nos remerciements et gratitude s'adressent aussi aux messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

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

*Chaib Mokrane et Rahab Tarik*

# *Dédicaces*

## *A ma chère et tendre mère*

A celle qui a tout souffert, sans me faire souffrir, qu'elle trouve dans ce mémoire le témoignage de ma reconnaissance et de mon affection pour tous les sacrifices, l'extrême amour et la bonté qu'elle m'a offert pour me voir réussir.

## *A mon cher père*

A l'homme que je dois ma réussite, mon bonheur, et tout le respect ; Qu'il trouve ici l'expression de mon affection et une récompense des sacrifices consentis pour moi.

## *A mes sœurs*

A qui je souhaite toutes les réussites et le bien être.

## *A mon frère*

En témoignage de mon profond amour et respect, à qui je souhaite le succès et le bonheur.

## *A mes amis*

A tous mes ami(e)s, tous ceux que j'aime, tous ceux qui m'aiment et tous ceux qui me sont chers.

J'offre ce travail qui représente le fruit de leurs sacrifices, leurs aides et leur dévouement.

*chaib mokrane*

# *Dédicaces*

*Je rends grâce à dieu de m'avoir donné le courage et la volonté ainsi que la conscience d'avoir pu terminer mes études.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A Mes très chers parents, pour leurs sacrifices et leur dévouement pour mon bonheur.*

*A mes deux petites sœurs a qui je souhaite toutes les réussites et le bien être.*

*A mon frère, En témoignage de mon profond amour et respect, aux quels je souhaite le succès et le bonheur.*

*A ma grand mère a qui je souhaite une bonne sante et une longue vie.*

*A mes amis, tous ceux que j'aime, tous ceux qui m'aiment et tous ceux qui me sont chers.*

***Rahab Tarik***

# ***sommaire***

<b>Introduction Générale</b> .....	1
------------------------------------	---

**Chapitre I : Aperçu sur le haut rendement des moteurs asynchrones et la maîtrise D'énergie.**

Introduction :	2
I.1.la maîtrise d'énergie :	2
I.1.1. Définition et concept de la maîtrise de l'énergie :	2
I.1.2.Maîtrise d'énergie en Algérie :	3
I.1.3. Effet des machines électriques sur la maîtrise d'énergie :	3
I.2. Moteurs à induction à haut rendement :	4
I.2.1. Spécificités des machines à induction à haut rendement :	4
I.2.1.1. Caractéristiques techniques :	4
a. Les performances attendues du moteur :	5
b. Les conditions d'environnement du moteur :	5
c. La protection nécessaire ainsi que toute option supplémentaire :	5
I.2.1.2. Tension d'alimentation :	5
I.2.1.3. Vitesse :	6
I.2.1.4. Couple :	6
I.2.2 Caractéristiques des moteurs à haut rendement :	6
I.2.3.Avantage d'utilisation des moteurs à haut rendement :	7
I.2.4. Répartition et classes de rendement des moteurs électriques :	7
I.2.5. Facteurs Influent sur le rendement des moteurs électriques :	8
a .Qualité d'alimentation en énergie :	8
b.Charge du moteur.....	8
c.Maintenance du moteur.....	8
d.Plage d'utilisation des moteurs.....	9
I.2.6. Economie d'énergie par les moteurs à induction à haut rendement :	9
I.2.7. Economies réalisées par l'amélioration du facteur de puissance :	9
I.2.8. Analyse technico-économique :	10
I.2.9. Moteurs à induction produits en Algérie :	11
I.2.9.1.E.E.I Azazga :	11
I.2.9.2. Position du produit algérien :	11
Conclusion.....	15

## Chapitre II : Aperçu théorique sur les moteurs asynchrones.

Introduction : .....	16
II.1.Conception des parties actives de la machine asynchrone : .....	16
II.1.1. Noyau statorique : .....	16
II.1.2.Noyau rotorique : .....	16
a) rotor a cage d'écureuil : .....	17
b) rotor bobiné : .....	17
II.1.3.bobinage... ..	17
II.1.4.les organes mécaniques : .....	18
II.2.symbles : .....	18
II.3.principe de fonctionnement du moteur asynchrone : .....	18
II.4. Classification des moteurs à cage d'écureuil: .....	19
II.5.Démarrage des moteurs asynchrones : .....	21
II.5.1.Démarrage sous tension réduite : .....	21
II.5.1.a. démarrage étoile-triangle : .....	21
II.5.1.b.démarrage par autotransformateur : .....	22
II.5.1.c.démarrage résistif : .....	22
II.5.2.démarrage a tension nominale : .....	22
II.5.2.a. démarrage rotorique : .....	22
II.6.freinage des moteurs asynchrones : .....	22
II.6.1.freinage hyper synchrone : .....	22
II.6.2.freinage par injection de courant continu : .....	22
II.6.3.le freinage a contre-courant : .....	22
II.6.4.Freinage mécanique par électro-frein : .....	23

## Chapitre III : calcul de la machine asynchrone.

III.1.Calcul électromagnétique : .....	24
III.1.1.Dimensionnement de la machine asynchrone : .....	25
III.1.1.1.Dimensionnement du stator : .....	26
III.1.1.2.Dimensionnement de la feuille statorique:..... ; .....	27
III.1.1.3.Dimensionnement du rotor : .....	30
III.1.1.4.Dimensionnement de la feuille rotorique : .....	31
III.1.1.5.Dimensionnement de l'anneau : .....	32
III.1.2.Calcul du circuit magnétique : .....	33
III .1 .2.1.Circuit magnétique statorique : .....	34
III .1.2.2.Circuit magnétique rotorique : .....	35
III.1.2.3. Force magnétomotrice dans l'entrefer : .....	35
III.1.2.4.Force magnétomotrice totale par paire de pole : .....	36
III.1.2.5.Coefficient de saturation : .....	36
III.1.2.6.Courant magnétisant : .....	36



III.1.2.7. Réactance de magnétisation :.....	36
III.1.2.8 .Coefficient de dispersion magnétique du stator :.....	37
III.1.2.9. Force électromotrice a vide Eo :.....	37
III.1.3. Calcul des paramètres électriques des enroulements :.....	37
III.1.3.1.Paramètres statoriques :.....	37
III.1.3.2.Paramètres rotoriques :.....	39
III.1.3.2.1.Resistance rotorique :.....	39
III.1.3.2.2. Réactance de dispersion et perméance du rotor.....	41
III.1.3.2.3.Réactance du rotor ramenée au stator :.....	42
III.1.3.3.Paramètres au démarrage :.....	43
III.1.4.Calcul des pertes et du rendement :.....	44
III.1.4.1.Pertes principales dans le fer :.....	45
III.1.4.3.Pertes mécanique :.....	46
III.1.4.2.Pertes électriques dans le cuivre et dans l'aluminium :.....	46
III.1.4.4.Pertes supplémentaires :.....	46
III.1.4.5.Pertes totales :.....	47
III.1.4.6.rendement de la machine : .....	47
III.1.4.7.Calcul de la résistance de magnétisation :.....	47
III.1.5.Calcul des performances du moteur :.....	47
III.1.5.1.Schéma équivalent en L du moteur :.....	48
III.1.5.2.Caractéristiques de fonctionnement du moteur :.....	48
III.1.5.3.Caractéristiques de démarrage et capacité de surcharge :.....	51
 <b>Chapitre IV : élaboration du programme de calcul.....</b>	<b>55</b>
 <b>Chapitre V : Interprétation et comparaison des résultats.....</b>	<b>90</b>
 <b>Conclusion générale</b>	
<b>Annexe</b>	
<b>Bibliographie</b>	

## ***Introduction Générale***

En raison de leur construction simple et robuste, les moteurs asynchrones et plus particulièrement ceux à cage d'écureuil, représentent environ 90-95% de la consommation d'énergie des moteurs électriques, ce qui équivaut à environ 53% de la consommation d'énergie électrique totale. Ils sont largement utilisés en tant qu'entraînements électriques dans l'industrie, le service public, la traction, les électroménagers, ...etc.

Suivant l'augmentation continue du coût de l'énergie et de la pression causée par le souci de la protection de l'environnement, les fabricants des machines électriques ainsi que les consommateurs s'intéressent à la réduction de la consommation d'énergie des systèmes électriques. Ce qui a conduit au lancement d'importants travaux à travers le monde, particulièrement pour l'amélioration du rendement des machines. Cela est dû principalement à la place qu'elles occupent.

Puisque la plupart des moteurs électriques utilisés dans l'industrie sont surdimensionnés, et un bon nombre d'entre eux sont soumis à une charge variable dans le temps. Cela signifie, dans la pratique courante qu'ils fonctionnent généralement loin de leur capacité nominale, donc loin de leur rendement optimal et que leur consommation d'électricité est excessive par rapport aux besoins réels. Pour la réduire, trois solutions sont proposées à savoir :

- a) Adapter la vitesse au besoin (lorsque le moteur a déjà été construit).
- b) Optimiser le rendement (optimisation de la conception).
- c) Réaliser des opérations de maintenance.

C'est dans le cadre de l'optimisation du rendement (optimisation de la conception) que s'inscrit la problématique de notre travail ; qui consiste à améliorer le rendement d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil en passant d'un rendement de 84 % à plus de 87,7 (haut rendement) en agissant sur des différents paramètres de la machine comme l'induction magnétique et la charge linéaire.

Nous avons utilisé une méthode de calcul précise, elle repose essentiellement sur des formules développées en associant les connaissances théoriques et les expériences pratiques des constructeurs, en utilisant le logiciel de calcul et de programmation. Enfin on va déterminer les caractéristiques du fonctionnement de ce dernier.

On a devisé le contenu de notre travail en cinq chapitres dont le premier est consacré pour un aperçu sur le haut rendement des moteurs asynchrones et la maîtrise de l'énergie, Le deuxième chapitre présente une approche théorique sur les moteurs asynchrones, tandis que le troisième chapitre correspond au calcul du moteur asynchrone, le quatrième chapitre est réservé à l'élaboration du programme de calcul. Dans le cinquième chapitre, on a fait l'interprétation et la comparaison des résultats obtenus dans le programme de calcul, Et on a terminé par une conclusion générale.

*Cahier de charge du moteur de notre étude :*



*Puissance nominale : 5,5KW.*

*Tension nominale : 380 V.*

*Nombre de paire de pôles : 2*

*Fréquence du réseau d'alimentation :  $f=50\text{Hz}$ .*

*Facteur de puissance :  $\cos \phi=0,85$ .*

*Rendement :  $\eta =0,877$ .*

*Hauteur d'axe  $h=130\text{ mm}$ .*

*Nombre de phases  $m=3$ .*

*Classe d'isolation : F.*

*Degré de protection : IP54.*

# ***Chapitre I***

**Aperçu sur le haut rendement des moteurs  
asynchrones et la maîtrise d'énergie**

## **Introduction :**

A cause de la facilité de son alimentation, la simplicité de sa construction, sa robustesse, son entretien limité et aussi son prix relatif intéressant, la machine asynchrone ou machine à induction, couvre la plupart des applications tant industrielles qu'à usage domestique.

Une large gamme de puissance qui peut s'étendre de quelques centaines de Watts à quelques mégawatts. Les moteurs électriques utilisent plus de 50 % (approximativement deux tiers) de l'électricité qui est consommée dans la plupart des pays. Typiquement de 60- à 80% de l'électricité est employée dans le secteur industriel et de 25 à 40% de l'électricité est utilisée dans le secteur commercial et résidentiel, où les moteurs à induction représentent environ 90% de la consommation totale des moteurs électriques.

De nos jours, l'amélioration du rendement des moteurs électriques et son impact sur l'épargne d'énergie sont un grand défi pour les chercheurs et fabricants des moteurs dans le monde.

En raison du manque d'énergie électrique, des coûts élevés de sa production, Cela a conduit à soutenir le développement des moteurs à haut rendement avec un fonctionnement à rendement optimal, ce qui peut mener à une économie substantielle d'énergie et par conséquent d'argent. Dans cet objectif, il a été lancé en 1999, en Algérie un programme national avec l'élaboration de la loi 99-09, du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise et la préservation de l'énergie électrique. Ce programme nous a poussé à la réflexion sur l'utilisation des moteurs à haut rendement dans un souci de maîtrise de l'énergie.

On s'intéressera dans ce chapitre à une présentation d'un aperçu sur les moteurs à haut rendement, avec un rappel sur le concept de la maîtrise de l'énergie. Ensuite on présentera la maîtrise d'énergie en Algérie par la présentation de l'apport de la loi relative à la maîtrise de l'énergie.

On insistera sur le rendement des machines asynchrones, les méthodes et normes pour l'évaluer, les facteurs influents et les avantages des moteurs à haut rendement. Finalement, on terminera par la présentation des moteurs à induction produits en Algérie et leur position par rapport à ceux produits à travers le monde.

### **I.1.la maîtrise d'énergie :**

#### **I.1.1. Définition et concept de la maîtrise de l'énergie :**

La maîtrise d'énergie résulte de la limitation de production et consommation de l'énergie en particulier les énergies non renouvelables produites à partir des combustibles fossiles .contrairement aux énergies renouvelables qui sont issues de l'activité du soleil, de l'eau, du vent, de la biomasse ou enfin de la géothermie. Les énergies renouvelables sont en conséquence des énergies inépuisables.

La maîtrise d'énergie induit beaucoup d'avantages, on peut citer quelques uns :

- a) Faire bénéficier aux consommateurs d'une diminution du montant de leurs factures d'électricité.
- b) Minimiser les impacts sur l'environnement en ne multipliant pas à l'excès les moyens de production, de transport et de distribution de l'électricité.
- c) Participer à une sensibilisation générale aux économies d'énergie.
- d) Optimiser les investissements publics liés à la distribution d'électricité pour faire face aux pointes de consommations.

### **I.1.2. Maîtrise d'énergie en Algérie :**

L'Algérie avec son potentiel d'hydrocarbures est probablement l'un des pays qui se sont engagés sur la voie de la maîtrise de l'énergie. En effet, les économies d'énergie sont perçues comme étant de nouvelles découvertes de gisements d'énergie. De plus, ils constituent une des composantes principales du développement durable en raison de leur relation directe avec la croissance économique et l'amélioration du niveau de vie.

La publication de la loi relative à la maîtrise de l'énergie en 1999 marque en effet, un pas décisif et un tournant capital dans l'évolution de cette prise de conscience sur la nécessité de la prise en charge effective de la maîtrise de l'énergie sur le terrain. Et c'est à la faveur du nouveau contexte de mondialisation et de globalisation des échanges, que le Gouvernement algérien a engagé depuis l'année 2000 des réformes, notamment dans le secteur de l'énergie, qui consacrent l'ouverture à la concurrence, la protection du consommateur et l'instauration de l'économie de marché comme une priorité de développement.

Le coup d'envoi en a été donné en mai 2001 suite à la tenue de la première conférence nationale sur la maîtrise de l'énergie et l'environnement dans un contexte d'économie de marché en Algérie.

### **I.1.3. Effet des machines électriques sur la maîtrise d'énergie :**

La force motrice requise pour opérer les ventilateurs, pompes, refroidisseurs, compresseurs et autres appareils électriques que l'on retrouve en grand nombre dans les édifices et industries, est essentiellement fournie par des moteurs électriques. Ces moteurs, qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique, peuvent représenter jusqu'à 60% de l'énergie électrique consommée dans les industries et 30 % dans les édifices.

Dans de nombreuses applications, les besoins de force mécanique varient selon les besoins de la charge raccordée (ventilateur, pompe, etc.).

Un moteur électrique s'adapte bien à ces variations mais au prix d'une baisse marquée de son efficacité et donc d'une augmentation de la dépense d'énergie.

Certaines pratiques de base ainsi que les développements technologiques récents offrent des solutions efficaces pour la transformation de l'énergie et sa modulation en fonction des besoins réels de la charge raccordée. La mise en œuvre de ces pratiques et de ces nouvelles technologies permet de valoriser le potentiel d'économie d'énergie disponible dans la demande de force motrice des édifices et industries. Plusieurs types de moteurs électriques sont disponibles, à savoir :

- a) Les moteurs à induction à cage d'écureuil ou à rotor bobiné monophasés et triphasés sont les moteurs électriques les plus utilisés aujourd'hui. Le moteur triphasé est privilégié pour son efficacité, sa simplicité de construction et sa fiabilité.
- b) Les moteurs synchrones sont essentiellement réservés aux fortes charges.
- c) Les moteurs à courant continu sont souvent réservés aux applications où la vitesse doit être contrôlée avec précision.

## **I.2. Moteurs à induction à haut rendement :**

Récemment, à la suite de la crise énergétique, une nouvelle génération de moteurs, appelés moteurs à haut rendement, a fait son apparition. Comme leur appellation l'indique, ces moteurs ont un rendement et un facteur de puissance supérieur à ceux des moteurs équivalents de construction classique. Leur coût d'achat plus élevé, est rapidement amorti par les économies d'énergie réalisées lorsqu'ils fonctionnent pendant de longues périodes et à des charges se rapprochant de la pleine charge.

On remarque pour les moteurs à induction à haut rendement une diminution importante des pertes et une amélioration sensible du facteur de puissance. Pour obtenir ces résultats, il a fallu réviser les critères de conception. En premier lieu, on utilise une plus grande quantité d'aciers de meilleure qualité pour construire le circuit magnétique. Ces aciers ont des pertes spécifiques qui s'élèvent à seulement 3,3W/kg au lieu de 6,6W/kg pour l'acier de qualité usuelle. De plus on a réduit la densité de flux et accru l'isolation entre les tôles de façon à réduire à la fois les pertes par Hystérésis et les pertes dues aux courants de Foucault. Le nombre d'encoches ainsi que leur forme ont été optimisés. On utilise aussi des conducteurs de 35 à 40% plus gros afin de réduire les pertes dues à l'effet joule.

### **I.2.1. Spécificités des machines à induction à haut rendement :**

#### **I.2.1.1. Caractéristiques techniques :**

Lors de l'achat d'un moteur, on doit fournir à l'utilisateur la liste des caractéristiques techniques désirées. Les fabricants tendent à mettre l'accent sur le rendement et la qualité dans la conception de moteurs plus gros. Les compromis entre divers paramètres de performance peuvent entraîner une diminution du rendement du

moteur. Il est donc très important de préciser par écrit, dès le début, le rendement désiré.

Les fabricants de moteurs offrent un produit résultant d'une série de recherches et d'essais. Tout écart des plans de base du fabricant et des normes de sécurité de l'industrie pourrait entraîner des problèmes imprévus.

**a. Les performances attendues du moteur :**

1. la puissance et le facteur de service.
2. l'échauffement et la classe d'isolation.
3. la tension d'alimentation.
4. le courant de démarrage maximal.
5. le couple de démarrage minimal.
6. le couple de décrochage (minimal ou maximal).
7. la plage des facteurs de puissance.
8. la plage des rendements.

**b. Les conditions d'environnement du moteur :**

1. la température ambiante.
2. l'altitude.
3. le taux d'humidité.
4. le degré d'abrasion.
5. le degré de sécurité.

**c. La protection nécessaire ainsi que toute option supplémentaire :**

1. Une protection thermique (système de thermostat/thermistance).
2. Un emplacement spécial pour la boîte de dérivation.

**I.2.1.2. Tension d'alimentation :**

Les moteurs à induction triphasés sont prévus pour fonctionner de façon satisfaisante sous des variations de tension de  $\pm 10\%$ .

Puisque le choix de la tension d'alimentation d'un moteur est un facteur important pouvant altérer son rendement ; **Le Tableau I.1** montre les effets d'une variation de tension de  $10\%$  sur un moteur à induction type de classe B à pleine charge :

Caractéristique	Tension	
	110%	90%
Glissement	-17%	+23%
Rendement	+1%	-2%
Facteur de puissance	-3%	+1%
Intensité du courant	-7%	+11%
Couple de démarrage	+21%	-19%
Courant de démarrage	+10%	-10%

**Le Tableau I.1**-Effets d'une variation de tension de  $10\%$  sur un moteur à induction



D'autre côté le déséquilibre des tensions de phase doit être inférieur à 1 % ; Un déséquilibre de tension de 3,5 % occasionne une augmentation de température de 25 % et un accroissement de courant de l'ordre de 6 à 10 fois la valeur du déséquilibre de tension, donc détérioration significative du rendement.

### **I.2.1.3. Vitesse :**

Les moteurs à vitesse élevée offrent habituellement un meilleur rendement. Cependant, cela ne signifie pas qu'il est toujours préférable d'utiliser un moteur à vitesse élevée et d'abaisser sa vitesse à l'aide des mécanismes conçus à cet effet afin de l'adapter à la charge. Les pertes de puissance se produisant au niveau des mécanismes d'abaissement de la vitesse pourraient réduire le rendement du système à une valeur inférieure à celle obtenue avec un moteur à commande directe et à faible vitesse.

### **I.2.1.4. Couple :**

Le couple mesure la force servant à produire une rotation. Les dimensions du moteur sont proportionnelles à son couple et non à sa puissance en hp (Puissance = Couple x Vitesse). Ainsi, un moteur à couple élevé est plus gros et coûte habituellement plus cher. Les moteurs à induction sont classés selon leur couple (modèles A, B, C, D et F). Le modèle le plus courant est le B et c'est le modèle de notre étude.

a) Les modèles C et D ont un couple de démarrage élevé.

b) Le glissement est plus élevé dans le cas du modèle D que dans le cas des modèles Bou C, puisque le modèle D, au couple à pleine charge, fonctionne à un pourcentage moindre de la vitesse synchrone.

## **I.2.2 Caractéristiques des moteurs à haut rendement :**

Les moteurs à haut rendement ont la même construction que les moteurs classiques mais ils se distinguent par:

1. L'acier mince et de haute qualité pour les tôles des circuits magnétiques.
2. En augmentant la section du stator et du rotor, on réduit la densité des flux magnétiques et, en conséquence, les pertes par hystérésis.
3. Les pertes par frottement sont diminuées par l'emploi de paliers plus petits ou de meilleure qualité.
4. Les pertes de ventilation peuvent être réduites en employant des ventilateurs plus petits. De toute façon, les moteurs à haut rendement fonctionnent à des températures plus basses que les moteurs classiques.
5. Une minimisation de l'épaisseur de l'entrefer entre le stator et le rotor.
6. Une grande longueur.
7. Une augmentation de la taille de la carcasse.

Pour un coût supplémentaire de 20 à 30%, les moteurs à haut rendement, ont un rendement meilleur de 2 à 6%, ce qui représente des économies d'énergie significatives.

La réduction des pertes permet une élévation moindre de la température dans le moteur, aussi de plus, dans de nombreux cas:

1. La fiabilité augmente.
2. Les coûts de maintenance et d'arrêt sont réduits.
3. La capacité de résistance aux surcharges s'améliore.
4. La résistance aux conditions de fonctionnement anormales – sous et sur tension, aux phases non équilibrées, aux variations de la forme de la puissance et du courant (par exemple les harmoniques), etc. s'améliore.
5. Le facteur de puissance s'améliore.

### **I.2.3. Avantage d'utilisation des moteurs à haut rendement :**

Il y a beaucoup d'avantages pour employer les moteurs à induction à haut rendement :

1. Ces moteurs à haut rendement produisent la même puissance de sortie, mais avec une puissance d'entrée électrique moindre que les moteurs standard.
2. Fiabilité et rendement suffisamment élevé.
3. Ces moteurs à haut rendement sont disponibles aux différentes puissances et avec différentes vitesses (750, 950, 1500, et de 3000 t/mn) à 220/380V.
4. L'économie à employer un moteur à haut rendement est beaucoup plus grande que son coût initial.
5. Ces moteurs à haut rendement ont typiquement 30-50 % de pertes inférieures que les moteurs standards équivalents.
6. Panne réduite en raison de leur conception et construction.
7. Donner beaucoup d'années de service valable au-delà de la période de remboursement initiale.
8. L'épargne significative en raison du choix, achat, fonctionnement efficace et correct du moteur pour une telle application.
9. Réduction de la sensibilité du facteur de puissance et le rendement aux fluctuations de tension et de charge.

### **I.2.3. Répartition et classes de rendement des moteurs électriques :**

Le terme « rendement » décrit le niveau d'efficacité avec lequel un moteur électrique transforme l'énergie électrique en énergie mécanique.

Depuis 2008, une nouvelle classification des moteurs de basse tension a été proposée et acceptée par les principaux fabricants internationaux. Suivant La norme CEI 60034-30 qui définit les classes de rendement des moteurs de puissance comprise entre 0,75 kW et 375 kW.

L'appellation « IE » fait référence à l'expression « International Efficiency » (rendement international) et est associé à un chiffre :

- IE1 = Rendement standard.
- IE2 = Haut rendement.
- IE3 = Rendement « Premium ».

#### **I.2.4. Facteurs Influent sur le rendement des moteurs électriques :**

Il y a un nombre de facteurs relatifs au fonctionnement et à l'entretien du moteur qui ont un grand effet sur son rendement. Dans le but de maintenir et d'améliorer le rendement de fonctionnement du moteur, plusieurs facteurs peuvent être utilisés.

Les techniques de commande du moteur, la qualité du système d'alimentation, le réseau de distribution, la taille des moteurs électriques, les moyens mécaniques de transmission, les problèmes d'entretien, cycles de gestion de charge...etc.

##### **a. Qualité d'alimentation en énergie :**

Les moteurs électriques et en particulier moteurs à induction, sont conçus pour fonctionner dans des conditions optimales, une fois alimentés par des formes d'ondes sinusoïdales triphasées symétriques avec la valeur de tension nominale. Les changements de ces conditions idéales peuvent causer la détérioration significative du rendement et une réduction de la vie de moteur ; exemple des alimentations à travers des convertisseurs ou les formes d'ondes qui sont riches en harmoniques.

##### **b. Charge du moteur :**

La charge du moteur peut avoir aussi un effet significatif sur son rendement. Un moteur chargé à plus de 50% a un rendement relativement stable. A charge plus faible, le rendement diminue considérablement. Les faibles rendements sont dus aux charges inadaptées (les sur charges) ou à un fonctionnement à vide des moteurs ; de telles conditions doivent être évitées.

##### **c. Maintenance du moteur :**

Les moteurs fonctionnent plus efficacement, durent plus longtemps et nécessitent moins d'attention s'ils sont nettoyés, refroidis, séchés et lubrifiés correctement. Les moteurs installés dans un environnement sévère et exposés à une grande humidité et à un lavage fréquent ont une durée de vie largement au dessous de la moyenne. Des corps étrangers ne doivent pas bloquer les branchements corrects font prolonger la durée de vie du moteur et maintiennent un rendement optimal.

**d. Plage d'utilisation des moteurs :**

D'une manière générale le rendement ( $\eta$ ) des moteurs électriques prend une valeur maximal pour :  $0.6 I_n \leq I \leq 1.0 I_n$ , car dans cette plage on considère, que le rapport des pertes à la puissance consommée est minimal. En dehors de cette plage, les pertes devenant beaucoup plus prépondérantes, entraînent la croissance de ce rapport donc une réduction du rendement ( $\eta$ ).

**I.2.5. Economie d'énergie par les moteurs à induction à haut rendement :**

L'adoption de systèmes moteurs à haut rendement énergétique permettrait de réduire la consommation annuelle d'électricité en Europe de 202 milliards de kWh, soit une réduction annuelle de 10 milliards d'euros en coûts de fonctionnement pour l'industrie. Cela présenterait également les avantages suivants :

1. Une économie annuelle de 5 à 10 milliards d'Euros de coûts de fonctionnement pour l'industrie européenne, grâce à une réduction de la maintenance et à une amélioration des opérations.
2. Une réduction de 45 GW des besoins en nouvelles capacités installées pour les centrales électriques au cours des 20 prochaines années.
3. Une réduction de 6 % des importations d'énergie de l'Europe. Pour atteindre ce résultat, un ensemble de mesures s'étalant sur 4 ans est proposé. Celui-ci prévoit d'investir 400 millions d'Euros dans le marché des systèmes entraînés par un moteur.

**I.2.6. Economies réalisées par l'amélioration du facteur de puissance :**

Le facteur de puissance d'un moteur à haut rendement peut être jusqu'à 7 % supérieur à celui d'un moteur standard. Cette différence peut entraîner des économies appréciables puisqu'elle a des répercussions sur le facteur de puissance de l'ensemble.

Puisque certaines entreprises affichent un haut facteur de puissance, nous ne calculerons pas ici les économies réalisées grâce à l'amélioration du facteur de puissance. On peut facilement calculer les économies annuelles d'électricité en utilisant l'équation :

Economies annuelles totales = économies réalisées par la réduction de la  
Consommation d'énergie + économies réalisées par la réduction de la demande  
+ économies réalisées par l'amélioration du facteur de puissance.

**I.2.7. Analyse technico-économique :**

Les moteurs à haut rendement coûtent généralement plus cher que les moteurs standards compte tenu de leurs caractéristiques particulières. Dans la plupart des cas, leur prix d'achat est vite recouvert par les économies qu'ils permettent de réaliser. L'importance de ces économies par rapport au prix d'achat détermine la rentabilité de l'installation du moteur à haut rendement.

L'analyse différentielle d'un moteur à haut rendement et d'un moteur standard permet d'illustrer ces méthodes en mesurant la différence entre les deux types de moteurs au chapitre du prix d'achat et du total des kW et des kWh utilisés.

Pour illustrer, l'épargne d'énergie on utilise les moteurs à induction à haut rendement avec une meilleure qualité d'alimentation en énergie électrique, deux types de moteurs sont analysés dans cette partie de notre travail, le premier classique, et le deuxième est à haut, Sachant que le prix national moyen de l'énergie est de 4 DA/kWh. La période annuelle moyenne d'utilisation est de 6000h, à 80% de la charge, ce qui est dans la gamme du rendement maximum. Le **Tableau I.2**, montre les économies annuelles relatives d'énergie, pour deux moteurs à induction classique et à haut rendement qui sont utilisés dans (U.E) puis dans (l'USA).

Tableau	Moteur(1)(78%) MI-Classiques E.E-IAzazga	Moteur(2)(85%) MI-Haut rendement (E.U)	Moteur(3)(87%) E-E.Ms (USA)	Economie d'énergie (1-2)	Economie d'énergie (1-3)
Energie (kWh)	13538,4	12423,5	12137,9	1114,9	1400,5
Prix (10 <sup>3</sup> .DA)	48,7384	44,7247	43,6965	4,0136	5,0418

**Tableau I.2 :** Energie et économie d'énergie avec les moteurs à induction à haut rendement de 2.2 KW.

## I.2.8. Moteurs à induction produits en Algérie :

### I.2.8.1. E.E.I Azazga :

En fait, Electro-Industries est leader en électrotechnique au niveau national. Aujourd'hui, l'entreprise produit son propre label après une production sous licence Siemens. Depuis le mois de mai 2004, cette EPE possède une certification ISO 9001 version 2000. Depuis sa transformation en SPA, l'entreprise a adopté une démarche qui lui assure son équilibre actuel : produits de qualité et une politique rigide de l'emploi. Cela lui permet de faire front à plusieurs défis :

1. Les produits Electro-Industries sont réalisés et contrôlés suivant les normes DIN VDE et sont conformes aux recommandations européennes IEC.
2. Le niveau élevé de leur qualité a été éprouvé de la clientèle locale (SONELGAZ, ENIEM, KAHRIF..) et étrangère.

3. Les produits peuvent être réalisés et adaptés à d'autres normes et spécifications techniques sur demande de la clientèle. Ces produits conviennent à la plupart des applications exigeantes de l'environnement industriel.

La bonne qualité des produits Moteurs, Alternateurs et Transformateurs; est en premier lieu tributaire d'une bonne qualité des matières d'achats destinées à leur confection.

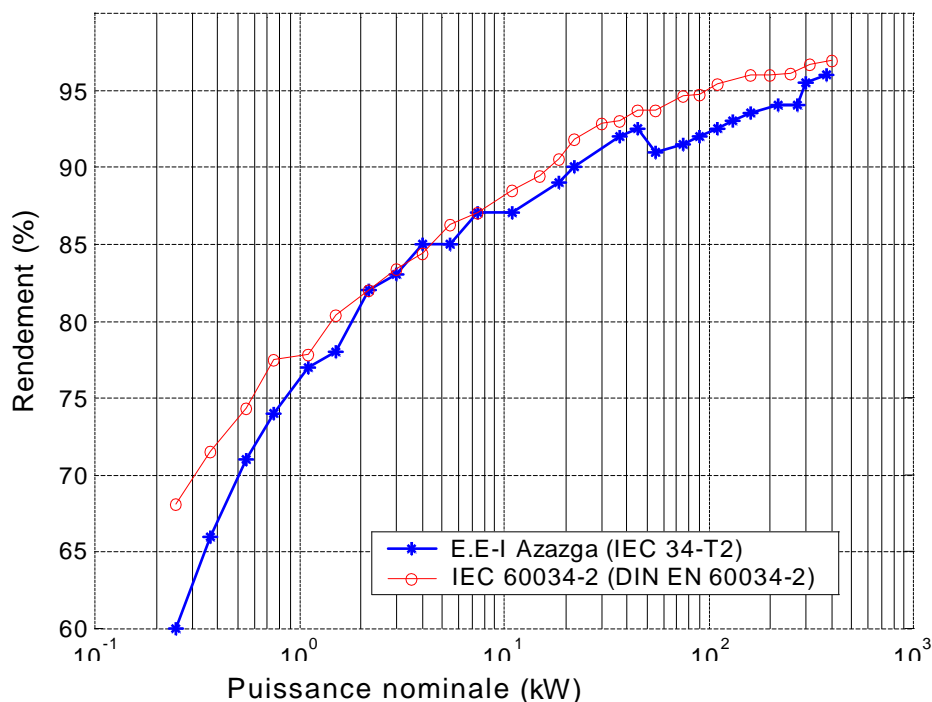
### Gammes des produits Electro-Industries (Moteurs Asynchrones Triphasés) :

<b>Puissance</b>	0,25 à 400 kW
<b>Tension</b>	380 V, 220/380 V
<b>Vitesse</b>	1000, 1500, 3000 trs/mn
<b>Forme de construction</b>	IMB3, IMB5, IMB35
<b>Classe d'isolation</b>	F
<b>Protection</b>	IP54-IP55

#### I.2.8.2. Position du produit algérien :

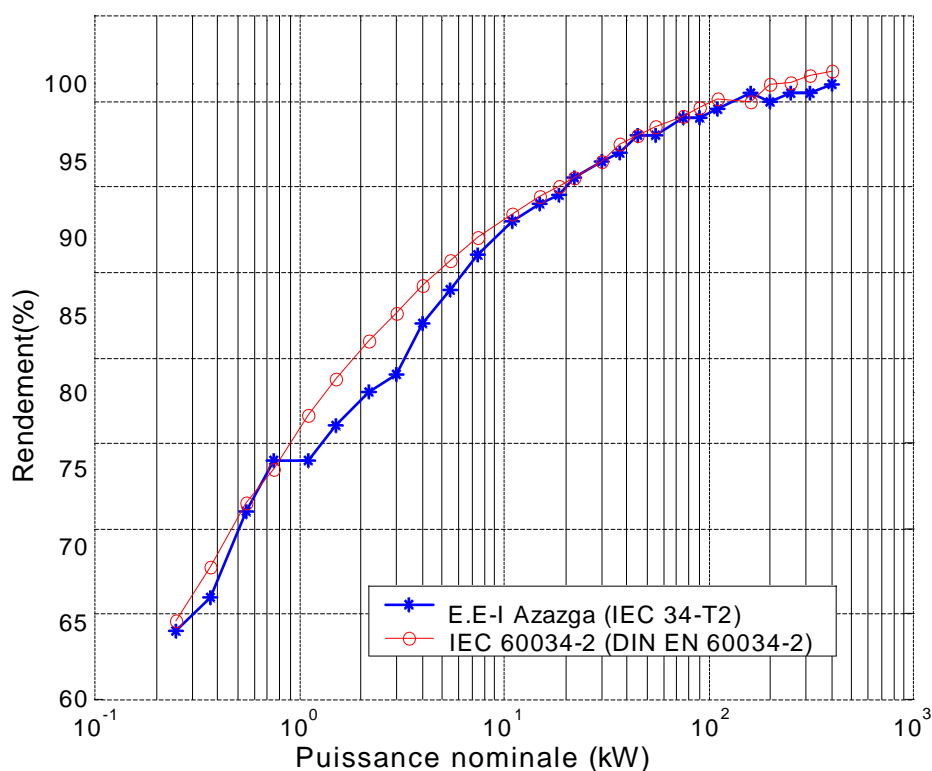
Une étude comparative a été effectuée sur le produit algérien relativement aux moteurs restant sur le marché et qui sont conformes à la norme IEC 34- T2.

Les Figures suivantes, illustrent le rendement du produit algérien réalisé et contrôlé selon la norme IEC 34-T2, est comparé avec celui utilisant la norme IEC 60034-2, pour les machines de  $2p=2, 4, \text{ et } 6$  pôles.



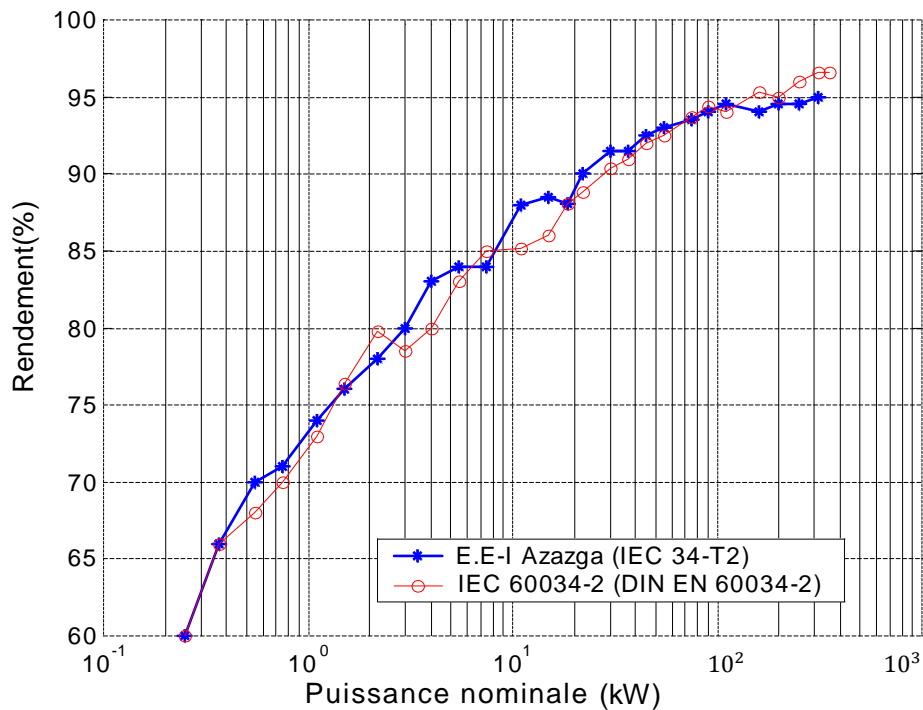
**Figure I.1** Rendement nominal pour les moteurs à 2 pôles pour différentes puissances

La **Figure I.1**, prouve que les moteurs d'E.E-I Azazga qui sont examinées selon la norme du IEC 34-T2 ont des rendements inférieurs (3-5%) que ceux du IEC 60034-2.



**Figure I.2** Rendement nominale pour les moteurs à 4 pôles pour différentes puissances

Dans la **Figure 1.2**, les deux normes donnent des rendements semblables, pour une puissance plus grand que 15 kW, mais les moteurs d'E.E-Azazga ont un rendement inférieur environ de 3-4% pour les moteurs de 0,75 à 11 kW.



**Figure I.3** Rendement nominal pour les moteurs à 6 pôles pour différentes puissances

L'analyse de la **Figure I.3**, montre une différence dans le rendement de 1-2% pour la grande majorité des moteurs pour les deux normes, pour les machines de 6 pôles.

Ces figures illustrent également, que le produit d'E.E-I Azazga doit être d'abord alignés sur la nouvelle exigence du rendement donnée par la norme du IEC 600342 afin d'être concurrentiel sur le marché international des machines à induction classiques.



#### **Conclusion :**

La notion de maîtrise de l'énergie désigne la gestion raisonnable de l'énergie disponible pour satisfaire les besoins exprimés par la société. Alors que la politique énergétique de l'offre considère souvent la demande comme une donnée insuffisante, la maîtrise de l'énergie vise précisément à agir sur la consommation d'énergie, à travers l'efficacité énergétique des technologies employées et le comportement des consommateurs. Or celui-ci dépend largement d'un environnement social, d'un mode de vie, d'une organisation de l'espace urbain, et la consommation d'énergie ne représente souvent qu'une préoccupation secondaire. S'il existe un intérêt collectif à maîtriser l'énergie, l'intérêt individuel reste faible. La maîtrise de l'énergie passe désormais davantage par une action sur les comportements de consommateurs eux-mêmes.

Dans ce chapitre, premièrement nous avons présenté la définition et le concept de la maîtrise de l'énergie, les différents facteurs qui influent sur le rendement des moteurs à induction. Deuxièmement nous avons donné les avantages des moteurs à induction à haut rendement par rapport à leurs homologues classiques et l'impact de ces moteurs sur l'économie d'énergie en Europe et aux USA. Finalement, la place des moteurs à induction produits en Algérie par le fabricant d'E.E-I Azazga, a été présentée par rapport à ceux utilisés dans les pays industriels.

Comme il est mentionné, il y a plusieurs approches pour économiser l'énergie électrique dont l'une est basée sur l'emploi des moteurs à induction à haut rendement, en tenant compte des meilleurs facteurs de qualité, conception et coûts.

Le prochain chapitre sera consacré à l'aperçu théorique sur le moteur asynchrone.

# ***Chapitre II***

**Aperçu théorique sur les moteurs asynchrones**

## Introduction

Les moteurs asynchrones triphasés sont les moteurs les plus employés le plus fréquemment dans l'industrie. Ils possèdent en effet plusieurs avantages ; simplicité, robustesse, prix peu élevé et entretien facile. Le moteur asynchrone triphasé (parfois appelé moteur à induction) comprend deux parties : le stator (fixe) et le rotor (tournant).

### II.1. Conception des parties actives de la machine asynchrone :

Deux composantes principales constituent le moteur asynchrone, souvent appelé moteur à induction. Elles sont faites de tôles d'acier au silicium et comportent des encoches dans lesquelles on place les enroulements.

L'une des composantes, appelée le stator, est fixe; on y trouve les enroulements reliés à la source. L'autre composante, nommée le rotor, est montée sur un axe libre de tourner.

#### II.1.1. Noyau statorique :

Le stator consiste en un empilement de tôles de fer au silicium dont l'épaisseur varie entre 0,35 et 0,50 mm. On utilise les tôles minces dans les moteurs pour lesquels on doit minimiser les pertes dans le circuit magnétique. Dans le cas où le diamètre du moteur ne dépasse pas quelques centaines de millimètres, les tôles sont découpées en une seule pièce. Pour les moteurs de grand diamètre, les tôles du stator et du rotor sont découpées par sections afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on recouvre habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude. Dans ces conditions, le rapport entre l'épaisseur véritable d'acier et l'épaisseur physique de l'empilement de tôles, nommé coefficient de foisonnement, se situe entre 0,92 et 0,94.

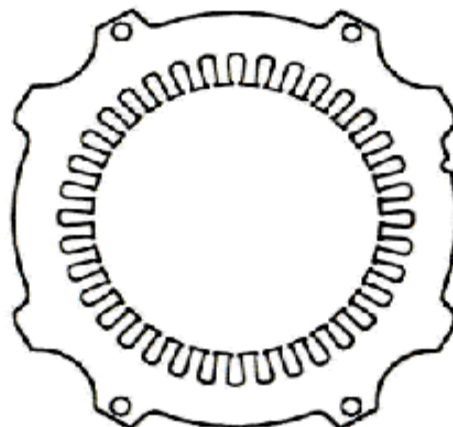


Fig. II.1 tôle de stator

### II.1.2. Noyau rotorique :

Le rotor est fait, comme le stator, de tôles empilées et habituellement du même matériau. Il est séparé du stator par un entrefer très court de l'ordre de 0,4 et 2mm seulement. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées en une seule pièce et assemblées sur un arbre.

Dans de plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections et montée sur un noyau.

Il existe deux types du rotor :

**a) Rotor a cage d'écureuil :** il est constitué de barres de cuivres nues introduites dans les encoches ; ces barres sont soudées à chaque extrémité à deux anneaux qui les court-circuitent. L'ensemble ressemble à une cage d'écureuil d'où le nom, ou simplement rotor a cage. Dans les moteurs de petites et moyennes puissances, les barres et les anneaux sont formés d'un seul bloc d'aluminium coulé.



Fig. II.2 Rotor à cage d'écureuil

**b) Rotor bobiné :** comprend un bobinage triphasé, semblable à celui du stator, placé dans les encoches. Il est composé de trois enroulements raccordés en étoile ; l'extrémité libre de chaque enroulement est reliée à une bague tournante avec l'arbre, ces bagues permettent par l'intermédiaire de trois balais, d'insérer une résistance extérieure en série avec chacun des trois enroulements lors du démarrage du moteur. En fonctionnement nominal les trois balais sont court-circuités.

### II.1.3. BOBINAGE :

On peut effectuer le bobinage d'une machine tournante de plusieurs façons, mais on utilise habituellement trois types d'enroulements: l'enroulement imbriqué, l'enroulement concentrique et l'enroulement ondulé. Chaque type présente des avantages dans certaines applications.

L'enroulement imbriqué s'emploie généralement pour le bobinage des stators de moteurs de quelques dizaines de kilowatts et plus. Dans le cas de petits moteurs asynchrones, particulièrement lorsque le bobinage est mécanisé, on utilise généralement l'enroulement concentrique.

L'enroulement ondulé est idéal pour les rotors des moteurs asynchrones à bagues . Leur disposition dans les encoches différencie ces différents types d'enroulements. L'enroulement concentrique est un bobinage obligatoirement à couche unique, de telle sorte que chaque encoche contient un seul côté de bobine. L'enroulement imbriqué et l'enroulement ondulé peuvent être des bobinages à simple couche, mais sont plus souvent à double couche. Si tel est le cas, chaque encoche contient deux côtés de bobine et le nombre de conducteurs par encoche doit nécessairement être un nombre pair.

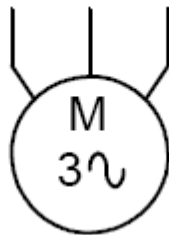
Il est possible de relier en série toutes les bobines de l'enroulement pour une même phase; on obtient alors un moteur qui ne peut opérer que sous une seule tension. Par contre, on peut répartir les bobines en un certain nombre de groupes à l'intérieur desquels elles sont connectées en série. Les groupes ainsi formés peuvent se relier en série ou en parallèle et permettre d'utiliser le moteur sous plusieurs tensions.

Lorsque les bobines sont faites de fils carrés ou rectangulaires d'assez forte section, elles sont formées sur des gabarits et insérées globalement dans des encoches ouvertes. Dans le cas d'encoches de type semi-ouvert, on utilise habituellement plusieurs fils ronds, vernis et de faible section pour former les conducteurs des bobines. Comme les bobines faites de fils carrés, elles sont généralement formées sur des gabarits, mais introduites fil par filou quelques fils à la fois dans les encoches.

#### II.1.4.les organes mécaniques :

Ils permettent la rotation du rotor (roulements), le maintien des différents ensembles (bâtis) et le refroidissement du moteur (ventilateur).

#### II.2.symbôles :



#### II.3.principe de fonctionnement du moteur asynchrone :

Le fonctionnement du moteur asynchrone triphasé est composé sur l'application des principes I(théorème d'Ampère),II(loï de Faraday) et III(loï de Lenz) de l'électromagnétisme ,au moment ou l'on ferme l'interrupteur pour brancher les enroulements du stator sur une ligne triphasée ,les tensions appliquées produisent des courants triphasés, ces derniers créent un champs tournant(principe I) qui induit une tension dans les barres du rotor(principe III) cette tension est alternative car les conducteurs sont tantôt devant un pole nord tantôt devant un pole sud du champ tournant. Les conducteurs étant court-circuités a leurs extrémités par les deux anneaux, la tension induite donne naissance a des courants intenses dans les barres, ces dernières

sont situées dans un champ magnétique ce qui produit des forces électromagnétique (principe II). Les forces tendent à entraîner le rotor dans le sens de rotation du champ.

#### **II.4. Classification des moteurs à cage d'écureuil:**

La NEMA (National Electrical Manufacturers Association) classe les moteurs à cage d'écureuil comme suit:

**Classe A:** Moteurs à couple normal et à courant de démarrage normal

**Classe B:** Moteurs à couple normal et à faible courant de démarrage

**Classe C:** Moteurs à fort couple et à faible courant de démarrage

**Classe D:** Moteurs à fort glissement

**Classe F:** Moteurs à faible couple et à faible courant de démarrage

Cette classification se base sur la variation de la résistance et de la réactance des enroulements du rotor.

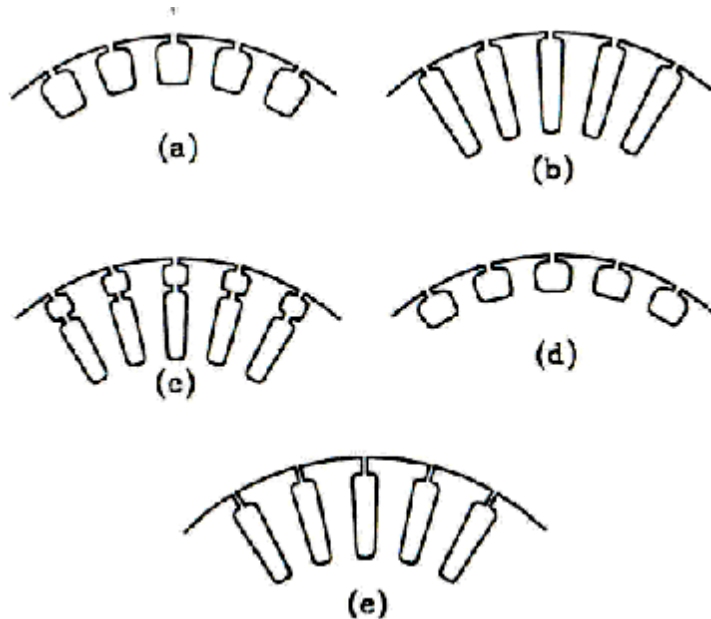
Au démarrage, la réactance d'un conducteur est d'autant plus grande que ce dernier est loin de l'entrefer. La résistance dépend de la longueur du rotor, de la section des conducteurs et du matériau utilisé. Plus cette résistance est grande, plus le courant de démarrage est petit et meilleur est le couple de démarrage, jusqu'à une certaine limite, bien entendu. Il est donc possible d'expliquer les différentes caractéristiques obtenues pour les diverses classes.

- L'encoche du rotor d'un moteur de classe (A) n'est pas tellement creuse et l'enroulement a une faible résistance. De même, la réactance est faible et presque uniforme pour tout le conducteur; il en résulte que le courant circule dans tout le conducteur. Le couple est normal et le courant de démarrage est suffisamment élevé.

- Le moteur de classe B est le plus utilisé de nos jours. Ses caractéristiques découlent de l'emploi d'encoches profondes et étroites (fig. II.3.b). Lors du démarrage, la réactance est plus forte dans le bas du conducteur; cela force le courant à passer surtout dans le haut du conducteur, ce qui en réduit la surface active et augmente sa résistance. Le courant se trouve ainsi limité et on peut, dans bien des cas, démarrer ce moteur à pleine tension; c'est un avantage par rapport au moteur de classe A (fig. II.3.a). Le couple au démarrage demeure toutefois normal.

- Un moteur de classe C possède un rotor à double cage d'écureuil (fig. II.3.c). On peut construire cet enroulement de différentes façons. Le principe consiste à placer un enroulement de forte résistance près de l'entrefer et un enroulement de faible résistance loin de la surface. Durant le démarrage, le conducteur éloigné de l'entrefer a une grande réactance, ce qui force le courant à passer dans le conducteur extérieur. Le courant est donc faible mais le couple est fort.

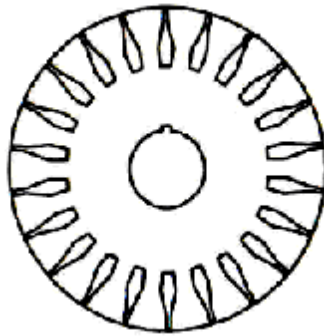
- Lorsque le rotor a atteint sa pleine vitesse, la réactance du conducteur situé le plus loin de l'entrefer devient faible; la répartition du courant est alors à peu près uniforme dans tout le conducteur.
- Un moteur de classe D, a un enroulement d'une grande résistance en raison de sa faible section (fig. II.3.d), ce qui lui confère au démarrage un fort couple ainsi qu'un faible courant. Par contre, il a un glissement à pleine charge qui peut atteindre 15 % et même 20 %.



**Fig. II.3.** Les différents types d'encoches rotorique. Classement de la NEMA.

- Les conducteurs du rotor d'un moteur de classe F sont placés loin de l'entrefer. Au démarrage, la réactance est grande et le courant est faible, mais le circuit est très inductif et le couple développé est faible.

On peut ainsi obtenir les caractéristiques recherchées par le choix d'une forme d'encoche appropriée, forme qui n'est pas nécessairement rectangulaire, surtout si les conducteurs sont en aluminium coulé. On retrouve des configurations d'encoches plus complexes (fig. II.4) qui, même s'il s'agit d'une cage simple, donnent un comportement qui tend beaucoup vers celui d'une double cage.



**Fig. II.4.** Rotor a encoches spéciales.

### **II.5.Démarrage des moteurs asynchrones :**

Lors d'un démarrage d'un moteur asynchrone, le courant peut atteindre 8 fois le courant nominal de la machine. Si l'application utilise un variateur, c'est ce dernier qui se chargera d'adapter les tensions appliquées au moteur afin de limiter ce courant. En absence de variateur de vitesse, il existe plusieurs méthodes permettant de limiter le courant de démarrage .elles ont été développées avant l'apparition d'électronique de puissance, mais sont encore utilisées de nos jours dans les installations anciennes ou par mesure d'économie pour des applications ne nécessitant pas de variateur en dehors du démarrage.

#### **II.5.1.Démarrage sous tension réduite :**

Plusieurs dispositifs permettent de réduire la tension aux bornes des enroulements du stator pendant la durée du démarrage du moteur ce qui est un moyen de limiter l'intensité des courants de démarrage .L'inconvénient est que le couple moteur est également diminué et que cela augmente la durée avant laquelle le moteur atteint le régime permanent.

##### **II.5.1.a .Démarrage étoile-triangle :**

Lors d'un démarrage étoile -triangle, le moteur est d'abord connecte au réseau avec un couplage étoile, puis une fois démarré on passe sur le couplage triangle.

Le fait de démarrer avec un couplage étoile permet de diviser par la racine carrée de trois la tension appliquée ;ainsi, le courant maximal absorbe est trois fois plus faible que lors d'un démarrage directement avec un couplage triangle. Le couple de démarrage est lui aussi trois fois plus faible que lors d'un démarrage en triangle. La surintensité lors du passage étoile triangle est inférieure au courant d'appel d'un démarrage effectué directement en triangle,réalisée simplement a l'aide des contacteurs, cette méthode de démarrage est très économique.



#### **II.5.1.b.démarrage par autotransformateur :**

Dans ce mode de démarrage le stator du moteur est relié à un autotransformateur qui permet d'effectuer un démarrage sous tension variable. la tension est progressivement augmentée, l'intensité du courant ne dépasse pas la valeur maximale désirée.

#### **II.5.1.c.démarrage résistif :**

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

#### **II.5.2.démarrage à tension nominale :**

##### **II.5.2.a. démarrage rotorique :**

Lors d'un démarrage rotorique, des résistances de puissances sont insérées en série avec les enroulements du rotor. ce type de démarrage permet d'obtenir un fort couple de démarrage avec des courants de démarrage réduits mais il ne peut être mis en œuvre qu'avec des machines à rotor bobiné muni de contacts glissants (bagues et balais) ; permettent des connexions électriques des enroulements rotoriques. ces machines sont de prix de revient plus importants.

#### **II.6.freinage des moteurs asynchrones :**

On distingue plusieurs types de freinage :

##### **II.6.1.freinage hypersynchrone :**

Lorsque la vitesse du rotor est supérieure à la vitesse du champ tournant, le moteur freine. Couple à un variateur de vitesse qui diminue progressivement la vitesse du moteur on peut arrêter le moteur. le couple de freinage est faible, cette méthode n'est donc pas très efficace pour freiner rapidement le moteur asynchrone.

##### **II.6.2.freinage par injection de courant continu :**

L'alimentation en courant continu du stator crée un champ fixe dans la machine qui s'oppose au mouvement. C'est la méthode la plus efficace pour freiner la machine mais les contraintes en courant sont également très sévères. le contrôle de l'intensité du courant continu permet de contrôler le freinage

##### **II.6.3.le freinage à contre-courant :**

Le principe consiste à inverser des phases pendant un court instant. ceci est donc équivalent à un freinage hypersynchrone, mais à fréquence fixe. Le couple résistant est donc faible et le courant appelé est également très important (de l'ordre de 10 à 12 fois l'intensité nominale). La conséquence en est que les enroulements du moteur risquent un sur-échauffement : on peut prévoir des résistances supplémentaires afin de diminuer

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

#### **II.6.4.Freinage mécanique par électro-frein :**

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

# ***Chapitre III***

**calcul du moteur asynchrone**

### III.1.Calcul électromagnétique :

#### III.1.1.Dimensionnement de la machine asynchrone :

Nous déterminons les dimensions géométriques des différentes parties du moteur toutes en respectant les critères techniques exigés et on tenant compte des contraintes électromagnétiques.

##### III.1.1.1.Dimensionnement du stator :

###### a)puissance électromagnétique :

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

$$P_e = K_e \cdot \frac{P_n}{\cos(\phi_n) \cdot \eta_n} \quad (\text{KW}) \quad (1.1)$$

Avec :

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

$\eta_n$  : Rendement nominal de la machine.

$K_e$  : Coefficient qui tient compte de la chute de tension dans le stator.

$$K_e = 0,98 - 5 \cdot P \cdot 10^{-3}.$$

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

Elle est donnée par :

$$L_i = \frac{6,1 \cdot P_e \cdot 10^{12}}{\alpha_i \cdot K_f \cdot N \cdot D_1^2 \cdot A_1 \cdot \beta_\delta \cdot K_{en1}} \quad (\text{mm}) \quad (1.2)$$

Où :

$\alpha_i$ : Coefficient de recouvrement polaire.

$K_f$ : Facteur de forme de la courbe d'induction.

$N$ : Vitesse de rotation de synchronisme.

$D_1$ : Diamètre intérieur du stator.

$A_1$ : Charge linéaire.

$B_\delta$ : Induction dans l'entrefer.

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

$$K_{en1} = K_{d1} \cdot K_{r1} \quad (1.3)$$

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

$$K_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m_1}\right)}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2m_1 \cdot q_1}\right)} \quad (1.4)$$

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

$$K_{r1} = \sin\left(\frac{\beta \cdot \pi}{2}\right) \quad (1.5)$$

$\beta$ : Rapport de raccourcissement.

● **Coefficient de longueur :**

Est le rapport entre la longueur virtuelle et le diamètre intérieur de la tôle du stator.

$$\lambda_i = \frac{l_i}{D_1} \quad (1.6)$$

● **Pas polaire en mm :**

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

$$\tau_{p1} = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot P} \quad [mm] \quad (1.7)$$

Avec :

P : Nombre de paires de pôles.

● **Pas polaire en nombres d'encoches:**

$$\tau_p = \frac{Z_1}{2 \cdot P} \quad (1.8)$$

$Z_1$ : Nombre d'encoches statorique.

● **Pas dentaire :**

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1} \quad [mm] \quad (1.9)$$

**c) Courant nominal :**

Il est donné par la formule suivante :

$$I_{n1} = \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_{n1} \cdot \cos(\phi_n) \cdot \eta_n} \quad [A] \quad (1.10)$$

$m_1$ : Nombre de phases statoriques.

$U_{n1}$ : Tension nominale.

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

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

$$U_{enc1} = \frac{a_i \cdot t_1 \cdot A_1 \cdot 10^{-3}}{I_{n1}} \quad (1.11)$$

$a_1$ : Nombre de voies parallèles.

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

Il est donné par la formule suivante :

$$W_1 = \frac{P \cdot q_1 \cdot U_{enc1}}{a_1} \quad (1.12)$$

● **Angle électrique :**

$$\gamma = \frac{P \cdot 360}{Z_1} \quad (1.13)$$

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

$$q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot P \cdot m_1} \quad (1.14)$$

● **Pas d'enroulement :**

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

$$y_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot P} - \varepsilon \quad (1.15)$$

$\varepsilon$  : Raccourcissement.

$\varepsilon = 0$

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

Elle est calculée par l'expression suivante :

$$S_{eff} = \frac{I_{n1}}{a_1 \cdot J_1} \quad [mm^2] \quad (1.16)$$

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

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

**III.1.1.2. Dimensionnement de la feuille statorique:****a) Largeur de la dent :**

La largeur de la dent est calculée à partir de la loi de conservation du flux à travers le pas dentaire, elle est représentée dans la figure III-1-a, elle est donnée comme suit :

$$b_{z1} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{z1max}} \quad [mm] \quad (1.18)$$

Avec :

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

$K_{fer} = 0,95$  Pour l'isolation avec oxydation.

$K_{fer} = 0,97$  Pour l'isolation en vernis.

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

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

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

$$h_{c1} = \frac{0,5 \cdot \alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{c1}} \quad [mm] \quad (1.19)$$

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

**c) Hauteur de la dent :**

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

$$h_{z1} = 0,5(D_{ext} - D_1) - h_{c1} \quad [mm] \quad (1.20)$$

$D_{ext}$ : Diamètre extérieur du stator.

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

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

$$b_{enc11} = \frac{\pi \cdot (D_1 + 0,2 \cdot h_{z1})}{Z_1} - b_{z1} \quad [mm] \quad (1.21)$$

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

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

$$b_{enc12} = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_{z1})}{Z_1} - b_{z1} \quad [mm] \quad (1.22)$$

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

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

$$h_{enc1} = h_{z1} - h_{f1} - h_{k1} \quad [mm] \quad (1.23)$$

Avec :

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

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

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

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

$$S_{en1} = 0,5 \cdot (b_{enc11} + b_{enc12}) \cdot h_1 + \frac{\pi \cdot b_{enc12}^2}{8} - S_{iso} \quad [mm] \quad (1.24)$$

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

$$S_{iso} = 0,5 \left( \pi \cdot \frac{b_{enc12}}{2} + 2 \cdot h_1 + b_{enc11} \right) \cdot e_1 \quad [mm] \quad (1.25)$$

$e_1$  : Epaisseur de l'isolant.

**h) Coefficient de remplissage :**



Le coefficient de remplissage est défini comme étant le rapport de la section des conducteurs occupants l'encoche à la section utile de l'encoche, il doit varier dans l'intervalle (0,7-0,75), il est donnée par l'expression suivante :

$$K_{r1} = N_{elt} \cdot \frac{d_{iso}^2}{S_{enc1}} \quad (1.26)$$

Avec :

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

$d_{iso}$ : Diametre de conducteurs avec isolation.

$S_{enc1}$ : Section de l'encoche en [ $mm^2$ ].

### i) Vérification des charges électromagnétique :

Après avoir calculé le nombre de conducteurs effectifs dans une encoche et choisi la section normalisée, on passera à la vérification de la charge linéaire  $A_1$ , l'induction  $B_\delta$  et le flux  $\Phi$ .

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

#### • Charge linéaire :

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

$$A_1 = \frac{I_{n1} \cdot U_{enc1} \cdot Z_1}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1 \cdot 10^{-3}} \quad [A/m] \quad (1.27)$$

#### • Induction magnétique dans l'entrefer :

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

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot L_i \cdot 10^{-6}} \quad [T] \quad (1.28)$$

#### • Flux sous un pole :

$$\Phi = \frac{U_{n1} \cdot K_e}{4 \cdot K_f \cdot f_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad [Weber] \quad (1.29)$$

#### • Choix de l'entrefer :

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

liée a la puissance de la machine. Il est donné en fonction de la hauteur d'axe et le nombre de paires de pôles.

### III.1.1.3. Dimensionnement du rotor :

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

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

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

#### b) Diamètre extérieur du rotor :

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

$$D_2 = D_1 - 2 \delta \quad [mm] \quad (1.30)$$

Ou :

$\delta$ : L'épaisseur de l'entrefer.

#### ● Pas dentaire rotorique :

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

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad [mm] \quad (1.31)$$

Avec :

$Z_2$ : Le nombre d'encoches rotorique.

$D_2$ : Le diamètre extérieur du rotor en [mm].

#### c) Courant dans la barre :

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

$$I_2 = 1,11 \cdot \frac{I_{n1} \cdot m_1 \cdot K_{en1} \cdot W_1 \cdot \cos(\phi_n)}{m_2 \cdot W_2 \cdot K_{en2}} \quad [A] \quad (1.32)$$

Le rotor de notre machine est a cage d'écureuil, on considère que cette cage est un enroulement polyphasé a nombre de phase  $m_2$  égal au nombre d'encoche  $Z_2$ . Donc  $K_{en2} = 1$  et  $W_2 = 0,5$ , dans ce cas on aura :

$$I_2 = 1,11 \cdot I_{n1} \cdot 2 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot \cos(\phi_n) \cdot \frac{K_{en1}}{Z_2} \quad [A] \quad (1.33)$$

Avec :

$I_{n1}$ : Courant nominal statorique.

$W_1$ : Nombre de spires statorique.

$K_{en1}$ : Facteur de bobinage statorique.

#### III.1.1.4. Dimensionnement de la feuille rotorique :

La feuille rotorique est représentée par la figure III-2-a :

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

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

$$h_{c2} = 0,5 \cdot \frac{\alpha_i \cdot \tau_{p2} \cdot B_{\delta}}{K_{fer} \cdot B_{c2}} \quad [mm] \quad (1.34)$$

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

##### • Pas polaire rotorique en mm :

$$\tau_{p2} = \pi \cdot \frac{D_2}{2 \cdot P} \quad [mm] \quad (1.35)$$

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

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

$$h_{z2} = 0,5 \cdot (D_2 - D_{int2}) - h_{c2} \quad [mm] \quad (1.36)$$

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

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

##### c) Largeur de la dent :

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

$$b_{z2} = \frac{t_2 \cdot B_{\delta}}{K_{fer} \cdot B_{z2max}} \quad [mm] \quad (1.37)$$

$B_{z2max}$ : Induction admissible dans la dent rotorique en [T].

##### d) Diamètre supérieur de l'encoche :

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

$$d_{z1} = \left[ \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{f2}) - Z_2 \cdot b_{z2}}{(Z_2 - \pi)} \right] \quad [mm] \quad (1.38)$$

Avec :

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

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

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

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

$$d_{22} = \left[ \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{z2}) - Z_2 \cdot b_{z2}}{(Z_2 + \pi)} \right] \quad [mm] \quad (1.39)$$

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

La hauteur de l'encoche est donnée comme suit :

$$h_{enc2} = h_2 + 0,5 \cdot (d_{21} + d_{22}) \quad [mm] \quad (1.40)$$

Avec :

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

$$h_2 = h_{z2} - h_{f2} - 0,5 \cdot (d_{21} + d_{22}) \quad [mm] \quad (1.41)$$

**g) Cage rotorique :**

La cage rotorique est a barres d'aluminium logées dans des encoches ovales semi-ouvertes court-circuités a leurs extrémités par deux anneaux.

**•Section de la barre :**

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

$$S_b = 0,125 \cdot (d_{21}^2 + d_{22}^2) \cdot \pi + 0,5 \cdot (d_{21} + d_{22}) \cdot h_2 \quad [mm^2] \quad (1.42)$$

**•Densité du courant :**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$J_b = \frac{I_2}{S_b} \quad [A/mm^2] \quad (1.43)$$

**II.1.1.5.Dimensionnement de l'anneau :**

**•Section de l'anneau :**

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

$$S_{an} = (0,35 \div 0,45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_b}{2 \cdot P} \quad [mm^2] \quad (1.44)$$

**•Hauteur de l'anneau :**

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

$$h_{an} = (1,1 \div 1,25) \cdot h_{z2} \quad [mm] \quad (1.45)$$

● **Largeur de l'anneau :**

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

$$b_{an} = \frac{S_{an}}{h_{an}} \quad [mm] \quad (1.46)$$

● **Diamètre moyen de l'anneau :**

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

$$D_{an} = D_2 - h_{an} \quad [mm] \quad (1.47)$$

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

Elle s'exprime comme suit :

$$J_{an} = \frac{I_{an}}{S_{an}} \quad [A/mm^2] \quad (1.48)$$

Avec :

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

$$I_{an} = \frac{I_b}{K_{red}} \quad [A] \quad (1.49)$$

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

$$K_{red} = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot P}{Z_2}\right) \quad (1.50)$$

### III.1.2. Calcul du circuit magnétique :

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

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

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

$l_x$  : Représente la ligne moyenne du tronçon choisi.

Le calcul du champ magnétique sera fait pour une paire de pôles.

Le circuit magnétique de la machine asynchrone est constitué de cinq parties distinctes :

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

### III .1 .2.1.Circuit magnétique statorique :

Avec les inductions calculées auparavant, on peut déterminer les intensités des champs magnétiques dans les différentes parties de la machine.

#### a)longueur moyenne des lignes de champs dans la culasse statorique :

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$L_{c1} = \frac{\pi}{2P} (D_{ext} - h_{c1}) \quad [mm] \quad (2.1)$$

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

Elle est donnée par :

$$F_{c1} = H_{c1} \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (2.2)$$

Avec :

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

$H_{c1}$  est déterminé de la courbe  $H_{c1} = f(B_{c1})$ . Représenté dans le tableau III-3 (voir annexe).

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

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{z1} = H_{z1} \cdot h_{z1} \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (2.3)$$

Avec :

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

$h_{z1}$ -hauteur de la dent statorique en [mm].

### III .1.2.2.circuit magnétique rotorique :

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

Elle est donnée par la formule suivante :

$$L_{c2} = (D_2 - 2 \cdot h_{z2} - h_{c2}) \cdot \frac{\pi}{2P} + h_{c2} \quad [mm] \quad (2.4)$$

Avec :

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

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

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

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{c2} = H_{c2} \cdot L_{c2} \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (2.5)$$

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

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

Pour le type d'encoche représenté dans la figure III-2-b on a :

$$F_{z2} = H_{z2} \cdot (h_{z2} - 0,4 \cdot d_{21}) \quad [A] \quad (2.6)$$

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

**III.1.2.3. Force magnétomotrice dans l'entrefer :**

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

$$F_{\delta} = 0,8 \cdot B_{\delta} \cdot K_{\delta} \cdot \delta \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (2.7)$$

Avec :

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

$$K_{\delta} = K_{\delta1} \cdot K_{\delta2} \quad (2.8)$$

Avec :

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + (5 \cdot \delta \cdot t_2 / b_{f2})} \quad (2.9)$$

$$K_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{f2}}{t_2 - b_{f2} + (5 \cdot \delta \cdot t_1 / b_{f1})} \quad (2.10)$$

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

#### III.1.2.4. Force magnétomotrice totale par paire de pole :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F = \sum F_i = 2 \cdot (F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2} \quad [A] \quad (2.11)$$

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

#### III.1.2.5. Coefficient de saturation :

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

Il est donné par :

$$K_{\mu z} = \frac{F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} \quad (2.12)$$

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

Il est donné par :

$$K_{\mu} = \frac{\sum F_i}{2 \cdot F_{\delta}} \quad (2.13)$$

#### II.1.2.6. Courant magnétisant :

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

$$I_{\mu} = \frac{P \cdot \sum F_i}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad [A] \quad (2.14)$$

#### II.1.2.7. Réactance de magnétisation :

Elle est exprimée par :

$$X_m = \frac{K_e \cdot U_{n1}}{I_{\mu}} \quad [\Omega] \quad (2.15)$$

$K_e$  : Facteur de majoration, il vari entre 0,9 et 0,98.

#### III.1.2.8 .Coefficient de dispersion magnétique du stator :



Il est donné par :

$$\sigma_{\mu} = \frac{X_1}{X_m} \quad (2.16)$$

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

### III.1.2.9. Force électromotrice a vide $E_0$ :

Elle est donnée par :

$$E_0 = \frac{U_{n1}}{(1+\sigma_{\mu})} \quad [V] \quad (2.17)$$

### III.1.3. Calcul des paramètres électriques des enroulements :

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

#### III.1.3.1. Paramètres statoriques :

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

$$R_1 = \rho_{cu}(T) \frac{W_1 \cdot L_{w1} \cdot 10^3}{a_1 \cdot N_{el} \cdot q_{eff}} \quad [\Omega] \quad (3.1)$$

Avec :

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

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

Elle est donnée pour :

$$\begin{array}{ll} T=20 \text{ °C} & \rho_{cu}=17,2 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega \cdot m] \\ T=115 \text{ °C} & \rho_{cu} =24,4 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega \cdot m] \end{array}$$

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

$$L_{w1} = 2 \cdot (L_i + L_{f1}) \quad [mm] \quad (3.2)$$

Avec :

$L_i$ : Longueur virtuelle de l'induit.

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

$$L_{f1} = (1,16 + 0,14 \cdot P) \cdot b_{1moy} + 15 \quad [mm] \quad (3.3)$$

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

$$b_{1moy} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{z1}) \cdot Y_{1moy}}{Z_1} \quad [mm] \quad (3.4)$$

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

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

La réactance de fuite globale du stator comprend :

#### • Réactance de fuite d'encoche :

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

$$X_{enc1} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2}{q_1 \cdot P \cdot 10^8} \cdot \lambda_{enc1} \quad [\Omega] \quad (3.5)$$

#### • Réactance de fuite différentielle :

C'est le résultat des flux suivants :

- Flux de fuite de dent a dent a travers l'entrefer.
- Flux différentielle de phase.
- Flux différentielle de l'encoche.

Elle est donnée par :

$$X_{1d} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot W_1^2}{q_1 \cdot P \cdot 10^8} \cdot \lambda_{1d} \quad [\Omega] \quad (3.6)$$

#### • Réactance de fuite frontale :

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

Elle est donnée par :

$$X_{1f} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2}{q_1 \cdot P \cdot 10^8} \cdot \lambda_{1f} \quad [\Omega] \quad (3.7)$$

La réactance totale est donnée par :

$$X_1 = 1,58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2 \cdot \frac{\lambda_1}{q_1 \cdot P \cdot 10^8} \quad [\Omega] \quad (3.8)$$

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

$$\lambda_1 = \lambda_{enc1} + \lambda_{1d} + \lambda_{1f} \quad (3.9)$$

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

$$\lambda_{enc1} = \frac{h_1}{3 \cdot b_{enc12}} \cdot K_{b1} + \left( \frac{h_{11}}{b_{enc12}} + \frac{3 \cdot h_{k1}}{b_{enc12} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot K_{b2} \quad (3.10)$$

$K_{b1}, K_{b2}$ : Coefficients données suivant la figure III-3-6 (voir annexe)

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

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

Elle est donnée par la formule suivante :

$$\lambda_{1d} = \frac{0,9 \cdot t_1 \cdot (q_1 \cdot K_{en1})^2}{K_\delta \cdot \delta} \cdot K_{rr1} \cdot K_{dd1} \cdot K_{r1} \quad (3.11)$$

$$K_{r1} = 1 - \frac{0,033 \cdot b_{f1}^2}{\delta \cdot t_1} \quad (3.12)$$

Ou :

$K_{rr1}$ : Coefficient qui dépend de  $Q_1$  donnée par le tableau III-5. (voire l'annexe).

$K_{dd1}$ : Coefficient de fuite différentielle donnée par le tableau III-6. en fonction de  $\frac{Z_2}{P}$  et  $q_1$  (voire l'annexe).

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

$$\lambda_{1f} = 0,34 \cdot \frac{q_1 \cdot (L_{f1} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau_{p1})}{L_i} \quad (3.13)$$

### III.1.3.2. Paramètres rotoriques :

#### III.1.3.2.1. Résistance rotorique :

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

Pour le type d'encoche présenté dans la figure (III-1-b) on a :

$$R_b = \rho_{al}(T) \cdot \frac{L_i}{S_b} \cdot 10^3 \quad [\Omega] \quad (3.14)$$

Pour :

$$\begin{array}{lll} T= 20\text{ }^{\circ}\text{C} & \rho_{al}(T) = 28 \cdot 10^{-9} & [\Omega \cdot m] \\ T= 115\text{ }^{\circ}\text{C} & \rho_{al}(T) = 48,8 \cdot 10^{-9} & [\Omega \cdot m] \end{array}$$

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

**b) Resistance de l'anneau :**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{an} = \frac{\rho_{al}(T) \cdot 2\pi \cdot D_{an} \cdot 10^{+3}}{Z_2 \cdot S_{an}} \quad [\Omega] \quad (3.15)$$

Avec :

$S_{an}$ : Section de l'anneau en  $[mm^2]$ .  
 $D_{an}$ : Diametre moyen de l'anneau en  $[mm]$ .

**c) Resistance de l'anneau ramenée a la barre :**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{anram-b} = \frac{R_{an}}{(K_{red})^2} \quad [\Omega] \quad (3.16)$$

**c) Resistance de l'anneau ramenée au stator :**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{anram-s} = M \cdot R_{an-ram-b} \quad [\Omega] \quad (3.17)$$

$$M = \frac{4 \cdot m_1}{Z_2} \cdot \left( \frac{W_1 \cdot K_{en1}}{K_{ob}} \right)^2 \quad (3.18)$$

$K_{ob}$ : Coefficient d'obliquite des encoches rotorique, donnée comme suit :

$$K_{ob} = \frac{\sin(\alpha_{ob}/2)}{(\alpha_{ob}/2)} \quad (3.19)$$

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

$$\alpha_{ob} = \frac{2 \cdot \pi \cdot P \cdot \beta_{ob}}{Z_2} \quad [rad] \quad (3.20)$$

$M$ : Coefficient de reduction de la cage rotorique vers le stator.

$$\beta_{ob} = \frac{t_1}{t_2} \quad (3.21)$$

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

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

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

$$R_2 = R_b + R_{anram-b} \quad [\Omega] \quad (3.22)$$

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

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

$$R_{2ram} = M \cdot R_2 \quad [\Omega] \quad (3.23)$$

**III.1.3.2.2. Réactance de dispersion et perméance du rotor :**

Dans cette partie, on calcul :

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

Et dans le type d'encoche représenté dans la figure (III-2-b) on distingue aussi :

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

$$X_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot L_2 \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega] \quad (3.24)$$

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

$$\lambda_2 = \lambda_{2enc} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob} \quad (3.25)$$

$\lambda_{2enc}, \lambda_{3d}, \lambda_{2f}, \lambda_{ob}$ : Sont respectivement les perméances : d'encoche, différentielle, frontale et oblique.

On procède au calcul des différentes perméances.

● **Pérmeance d'encoche :**

$$\lambda_{2enc} = C_\lambda + \left( \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \right) \quad (3.26)$$

Avec :

$$C_\lambda = \Psi \left[ \left( \frac{h_2 + 0,4d_{22}}{3 \cdot d_{21}} \right) \cdot \left( \frac{(1 - \pi \cdot d_{21})}{8 \cdot S_b} \right)^2 + 0,66 - \left( \frac{b_{f2}}{2 \cdot d_{21}} \right) \right] \quad (3.27)$$

$\Psi$ : Représenté dans la figure (III-3-8) Pour le régime nominal on a  $\Psi = 1$ .

● **Pérmeance différentielle :**

$$\lambda_{2d} = \frac{0,9 \cdot t_2 \cdot \left( \frac{Z_2}{6 \cdot P} \right)^2}{\delta \cdot K_\delta} \cdot K_{dd2} \quad (3.28)$$

$K_{dd2}$ : Coefficient de fuite différentielle donnée en fonction de  $q_2$  voir figure III-4-1  
L'équation qui correspond à l'allure de la courbe est donnée par :

$$K_{dd2} = \frac{9,15}{100 \cdot \left( \frac{Z_2}{6 \cdot P} \right)^2} \quad (3.29)$$

● **Pérmeance frontale :**

$$\lambda_{2f} = \frac{2,3 \cdot D_{anmoy}}{Z_2 \cdot L_i \cdot (K_{dd2})^2} \log \left( \frac{4,7 \cdot D_{anmoy}}{2 \cdot (h_{an} + L_{an})} \right) \quad (3.30)$$

● **Permeance d'inclinaison d'encoches rotorique :**

$$\lambda_{ob} = \frac{t_2 \cdot \beta_{ob}}{9,5 \cdot \delta \cdot K_\delta \cdot K_\mu} \quad (3.31)$$

Avec :

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

**II.1.3.2.3. Réactance du rotor ramenée au stator :**

Pour le type d'encoche présenté dans la figure III-1-b on a :

$$X_{2ram} = M \cdot X_2 \quad [\Omega] \quad (3.32)$$

**III.1.3.3. Paramètres au démarrage :**

Lors de l'alimentation du moteur a rotor immobile, les barres de la cage sont soumises a un champ tournant de fréquence d'alimentation ( $f_1 = 50 \text{ Hz}$ ) ; la profondeur de penetration du courant est alors faible (effet refoulement des courants) ; seule la partie supérieure des barres est le siège des courants induits d'où une forte résistance de la cage au démarrage.

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

**a) Profondeur de pénétration :**

Elle est donnée par :

$$h_{pp} = \frac{h_p}{1+\varphi} \quad [mm] \quad (3.33)$$

Où :

$h_p$ : Hauteur de la barre.

$\varphi$ : Coefficient qui depend de la valeur de  $\xi$ , il est donné par la courbe de la **figure III-3-7**

$$\xi = 0,064 \cdot h_b \cdot \sqrt{g} \quad \text{pour} \quad T=115^\circ\text{C} \quad (3.34)$$

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

Elle est donnée par :

$$b_{pp} = d_{21} - \left[ \left( (d_{21} - d_{22}) / h_2 \right) \cdot \left( (h_{pp} - d_{12}) / 2 \right) \right] \quad [mm] \quad (3.35)$$

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

Elle est donnée par :

$$S_{bdem} = (\pi \cdot d_{21}^2 / 8) + [0,5(d_{21} + b_{pp})(h_{pp} - 0,5 \cdot d_{21})] \quad [mm^2] \quad (3.36)$$

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

Pour le type d'encoche donnée en figure III-2-b on a :

$$R_{bdem} = R_b \cdot K_{dep} \quad [\Omega] \quad (3.37)$$

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

$$K_{dep} = \frac{S_b}{S_{bdem}} \quad (3.38)$$

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

Elle est donnée comme suit :

$$R_{2dem} = R_{anram-b} + R_{bdem} \quad [\Omega] \quad (3.39)$$

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

Elle est donnée par :

$$R_{2dem-ram} = M \cdot (R_{anram-b} + R_{bdem}) \quad [\Omega] \quad (3.40)$$

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

Pour le type d'encoche donnée en figure (III-2-b) on a :

$$X_{2dem} = 7,9 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot \lambda_{2dem} \cdot 10^{-9} \quad [\Omega] \quad (3.41)$$

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

$$\lambda_{2dem} = \lambda_{2encdem} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob} \quad (3.42)$$

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

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

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

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

Pour notre type d'encoches :

$$X_{2demram-s} = M \cdot X_{2dem} \quad [\Omega] \quad (3.43)$$

### III.1.4. Calcul des pertes et du rendement :

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



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

On peut distinguer quatre groupes de pertes :

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

#### III.1.4.1. Pertes principales dans le fer :

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

##### a) Pertes dans les dents :

Les pertes dans les dents sont données par la formule suivante :

$$P_{fz1} = 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot B_{z1max}^2 \cdot G_{z1} \quad [w] \quad (4.1)$$

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

$$G_{z1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot [h_{z1} \cdot \pi \cdot (D_1 + h_{z1}) - S_{enc1} \cdot Z_1] \quad [Kg] \quad (4.2)$$

$G_{z1}$ : Poids des dents statorique.

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

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

$$P_{c1} = 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot G_{c1} \cdot B_{c1}^2 \quad [w] \quad (4.3)$$

$$G_{c1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot h_{c1} \cdot \pi \cdot (D_{ext} - h_{c1}) \quad [Kg] \quad (4.4)$$

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

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

$$P_{fer} = P_{c1} + P_{fz1} \quad [w] \quad (4.5)$$

### III.1.4.2. Pertes électriques dans le cuivre et dans l'aluminium :

Ce sont les pertes par effet joules dans les enroulements statorique et rotorique.

Elles sont proportionnelles au carré des courants qui circulent dans ces enroulements :

#### a) Pertes joules statorique :

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

$$P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_{n1}^2 \quad [w] \quad (4.6)$$

Avec :

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

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

#### b) Pertes joules rotorique :

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

$$P_{j2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad [w] \quad (4.7)$$

Avec :

$m_2$ : Nombre de phase rotorique. ( $m_2 = Z_2$ ).

$I_2$ : Courant dans la barre.

$R_2$ : Résistance d'une phase rotorique.

### III.1.4.3. Pertes mécaniques :

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

$$P_{mec} = K_t \cdot (N \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_{ext} \cdot 10^{-2})^4 \quad [w] \quad (4.8)$$

Avec :

$K_t$ : Facteur de majoration.

$$K_t = 1,3 \cdot (1 - D_{ext} \cdot 10^{-3})$$

$$K_t = 1$$

Pour  $2P = 2$ .

Pour  $2P > 2$ .

### III.1.4.4. Pertes supplémentaires :

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

$$P_{sup} = 0,005 \cdot \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n} \quad [w] \quad (4.9)$$

**III.1.4.5. Pertes totales :**

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{tot} = P_{fer} + P_{j1} + P_{j2} + P_{mec} + P_{sup} \quad [w] \quad (4.10)$$

**III.1.4.6. rendement de la machine :**

Le rendement de la machine par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_n \cdot 10^3}{P_n \cdot 10^3 + P_{tot}} \quad (4.11)$$

**III.1.4.7. Calcul de la résistance de magnétisation :**

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

$$I_{oa} = \frac{P_{fer} + P_{mec} + P_{a10}}{m_1 \cdot U_{n1}} = \frac{P_{fer} + P_{mec} + R_1 \cdot m_1 \cdot (I_\mu)^2}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad [A] \quad (4.12)$$

D'où :

$$R_m = \frac{X_m \cdot I_\mu}{I_{oa}} \quad [\Omega] \quad (4.13)$$

Avec :

$I_\mu$ : Courant magnétisant.

$X_m$ : Réactance magnétisante exprimée.

**III.1.5. Calcul des performances du moteur :**

Dans cette partie de calcul, nous étudions les performances des moteurs, en utilisant une méthode analytique se basant sur les schémas équivalents de la machine asynchrone. Il existe plusieurs schémas équivalents de machines asynchrones qui sont analogues à celui d'un transformateur :

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

Dans notre étude on utilise le schéma équivalent en L car il est le plus commode.

Ceci pour déterminer les caractéristiques de fonctionnement du moteur.

**III.1.5.1. Schéma équivalent en L du moteur :**

C'est un schéma conventionnel monophasé ramené au stator :

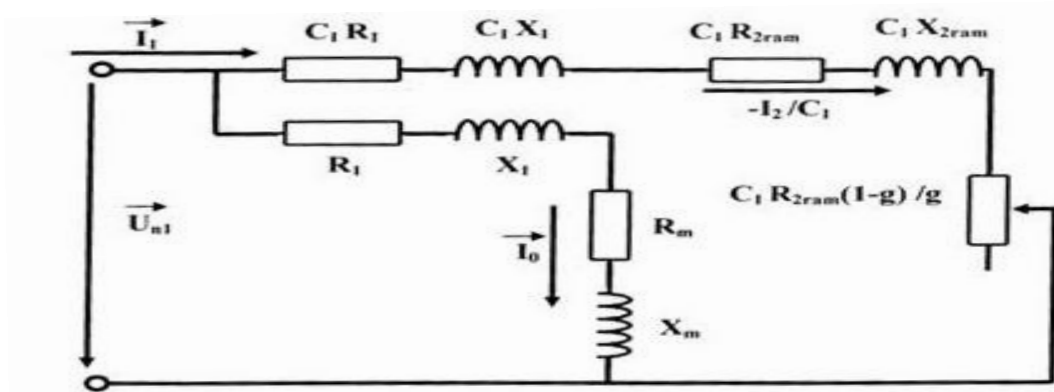


Fig III-5 schémas équivalent en L du moteur

Avec :

- $R_1$ : Résistance statorique en  $[\Omega]$ .
- $X_1$ : Réactance de fuite du stator en  $[\Omega]$ .
- $X_{2ram}$ : Réactance de fuite du rotor ramenée au stator en  $[\Omega]$ .
- $R_{2ram}$ : Résistance rotorique ramenée au stator en  $[\Omega]$ .
- $R_m$ : Résistance magnétisante en  $[\Omega]$ .
- $X_m$ : Réactance magnétique en  $[\Omega]$ .
- $C_1$ : Constante de transformation du schéma en T vers le schéma en L.

Elle est donnée par :

$$C_1 \approx 1 + \frac{X_1}{X_m} \quad (5.1)$$

**III.1.5.2. Caractéristiques de fonctionnement du moteur :**

En se référant à la figure III-5, on détermine :

a) Glissement :

$$g = \frac{A - \sqrt{A^2 - C_1^2 \cdot R_{2ram} \cdot B}}{B} \quad (5.2)$$

Avec :

$$B = 2A + R' \quad (5.3)$$

$$A = \frac{m_1 \cdot U_{n1}^2}{2P'_2} - R_1 \quad (5.4)$$

$$R' = R_{2ram} \left[ \left( \frac{R_1}{R_{2ram}} \left( 1 + \frac{X_{2ram}}{X_m} \right) \right)^2 + \left( \frac{X_1}{X_{2ram}} \left( 1 + \frac{X_{2ram}}{X_m} \right) + \frac{X_{2ram}}{R_{2ram}} \right)^2 \right] [\Omega] \quad (5.5)$$

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

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

$$P'_2 = P_2 + P_{sup} + P_{mec} \quad [W] \quad (5.6)$$

**c) Inductance équivalente :**

Elle est exprimée par :

$$Z_{2eq} = \sqrt{R_{2eq}^2 + X_{2eq}^2} \quad [\Omega] \quad (5.7)$$

Avec :

$$R_{2eq} = C_1 \cdot R_1 + C_1^2 R_{2ram} / g \quad [\Omega] \quad (5.8)$$

$$X_{2eq} = C_1 \cdot X_1 + C_1^2 X_{2ram} \quad [\Omega] \quad (5.9)$$

**d) Calcul du courant secondaire :**

Le courant dans le circuit secondaire est donnée par :

$$I_2'' = \frac{U_{n1}}{Z_{2eq}} \quad [A] \quad (5.10)$$

$$I_2' = C_1 \cdot I_2'' \quad [A] \quad (5.11)$$

Avec :

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

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

**e) Facteur de puissance rotorique :**

Le facteur de puissance rotorique est donnée par :

$$\cos \phi_2 = \frac{R_{2eq}}{Z_{2eq}} \quad (5.12)$$

D'où :

- Courant actif :

$$I''_{2a} = I''_2 \cdot \cos \phi_2 \quad [A] \quad (5.13)$$

- Courant réactif :

$$I''_{2r} = I''_2 \cdot \sin \phi_2 \quad [A] \quad (5.14)$$

- Courant actif qui correspond aux pertes fer et aux pertes joules statorique à vide :

$$I_{0a} = \frac{P_{a10} + P_{f1}}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad [A] \quad (5.15)$$

- Courant magnétisant :

$$I_{0r} = \frac{P \cdot \sum F_i}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad [A] \quad (5.16)$$

- Courant total à vide :

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \quad [A] \quad (5.17)$$

- Courant absorbé :

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} \quad [A] \quad (5.18)$$

Avec :

$$I_{1a} = I_{0a} + I''_{2a} \quad [A] \quad (5.19)$$

$$I_{1r} = I_{0r} + I''_{2r} \quad [A] \quad (5.20)$$

Le facteur de puissance de la machine est donné par :

$$\cos \phi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1} \quad (5.21)$$

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

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$P_1 = m_1 \cdot U_{n1} \cdot I_{1a} \quad [W] \quad (5.22)$$

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

Elle est donnée par la relation :

$$N_2 = N \cdot (1 - g) \quad [tr/min] \quad (5.23)$$

Avec :

$N$ : Vitesse du synchronisme.

$g$ : Glissement.

$N_2/N = 1 - g$  : C'est la vitesse relative du rotor par rapport au stator.

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

Il est donné par :

$$C_u = 9,55 \frac{P_2 \cdot 10^3}{P_n} \quad [N \cdot m] \quad (5.24)$$

**Remarque :**

Afin de pouvoir tracer les caractéristiques de la machine ; on a procédé dans le programme informatique comme suit :

On calcul la puissance en unité relative :

$$P_2^* = \frac{P_2}{P_n} \quad (5.25)$$

Ensuite, on fait varier la puissance  $P_2^*$  et on aura toutes les valeurs de tous les paramètres nécessaires pour tracer les caractéristiques de la machine, à savoir :

( $g, N_2, I_2, \cos \phi_n, C_u$ )

**III.1.5.3. Caractéristiques de démarrage et capacité de surcharge :**

**a) Résistance équivalente au démarrage :**

Elle est exprimée comme suit :

$$R_{eqdem} = C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot R_{2dem-ram} \quad [\Omega] \quad (5.26)$$

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

**b) Réactance équivalente au démarrage :**

Elle est donnée par la relation suivante :

$$X_{eqdem} = X_{const} + K_x \cdot X_{var} \quad [\Omega] \quad (5.27)$$

Avec :

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

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

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

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

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

$$X_{const} = C_1 \cdot X_1 \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_{1dem}}{\lambda_1} + C_1^2 \cdot X_{2dem-ram} \cdot \frac{\lambda_{2d} - \lambda_{2var}}{\lambda_{2var}} \quad [\Omega] \quad (5.28)$$

$$X_{var} = C_1 \cdot X_1 \cdot \frac{\lambda_{1dem}}{\lambda_1} + \frac{C_1^2 \cdot X_{2ram} \cdot \lambda_{2var}}{\lambda_2} \quad [\Omega] \quad (5.29)$$

Avec :

$\lambda_{2var}$ : Composante variable de la perméance d'encoche rotorique, elle est donnée par :

$$\lambda_{2var} = \lambda_{2encvar} + \lambda_{2d} \quad (5.30)$$

Ou :

$\lambda_{2encvar}$ : Composante variable de perméance d'encoche rotorique.  
Pour le type d'encoche ovale semi ouverte, on a :

$$\lambda_{2encvar} = \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \quad (5.31)$$

Avec :

$\lambda_1$ : Perméance statorique.

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

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

Elle est donnée par :

$$\lambda_{enc1d} = \left( \frac{3h_{k1}}{b_{enc1} + 2b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot K_{\beta 2} \quad (5.32)$$

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

### c) Capacité de surcharge :

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

$$K = \frac{C_{max}}{C_{nom}} = \frac{\frac{g_{nom} + g_{cr}}{g_{cr}} + R_{cr}}{2 + R_{cr}} \quad (5.33)$$



Avec :

$R_{cr}$ : Résistance critique.

$$R_{cr} = 2 \cdot R_1 \frac{g_{cr}}{(R_{2ram} \cdot C_1)} \quad (5.34)$$

$g_{nom}$ : Glissement nominal.

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

$$g_{cr} = \frac{C_1 \cdot R_{2ram}}{(X_1 + C_1 \cdot X_{2ram})} \quad (5.35)$$

Avec :

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

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

#### d) Courant de démarrage :

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

$$I_{1dem} = \frac{U_{n1}}{\sqrt{R_{eqdem}^2 + X_{eqdem}^2}} \quad [A] \quad (5.36)$$

$U_{n1}$ : Tension d'alimentation.

#### e) Le couple de démarrage :

Il est donné par l'expression suivante :

$$C_d = \frac{P \cdot m_1 \cdot U_{n1}^2 \cdot R_{2dem}}{2\pi f_1 (R_{eqdem}^2 + X_{eqdem}^2)} = P \cdot m_1 \cdot I_{1dem}^2 \frac{R_{2dem}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} [N \cdot m] \quad (5.37)$$

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

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

$$\frac{C_d}{C_{nom}} = 2 \div 2,2 \quad (5.38)$$

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

$$\frac{c_d}{c_{nom}} = 1,2 \div 1,4 \quad (5.39)$$

# ***Chapitre IV***

**Elaboration du programme de calcul**

**DONNEES INITIALES**

Puissance nominale	$P_n := 5.5$	(kW)
Nombre de phases	$m_1 := 3$	
La frequence	$f_1 := 50$	(Hz)
Tension nominale par phase	$U_n := 380$	(V)
Vitesse synchrone	$n := 1500$	$\left(\frac{\text{tr}}{\text{mn}}\right)$

**DIMENSIONS PRINCIPALES****La puissance electromagnetique  $P_e$** 

Facteur de majoration de la tension	$K_e := 0.97$
Facteur de puissance	$\cos 1(\varphi_n) := 0.85$
$\varphi_n := \arccos(0.85)$	$\varphi_n = 0.555$ rad
Rendement nominal	$\eta_{n1} := 0.877$
Nombre de paire de pole	$p := 2$

$$P_e := K_e \cdot \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_{n1} \cdot \cos 1(\varphi_n)} \quad P_e = 7156.8 \quad (\text{W})$$

**La longueur virtuelle de l'induit**

Coefficient de recouvrement polaire	$\alpha_\delta := 0.6366$
Facteur de la forme de la courbe d'induction	$K_f := 1.11$

**Le nombre d'encoches**

Le nombre d'encoches statoriques	$Z_1 := 36$
Le nombre d'encoches rotoriques	$Z_2 := 28$

**Le nombre d'encoches par pole et par phase**

$$q1 := \frac{Z1}{2 \cdot p \cdot m1} \quad q1 = 3 \quad \left( \frac{\text{encoches}}{\text{pole} \cdot \text{phase}} \right)$$

**Les diamètres du stator**

$$kD := 0.6728$$

Le diamètre extérieur du stator  $Dex1 := 200$

Le diamètre intérieur du stator  $D1 := kD \cdot Dex1 - 5$

$$D1 = 129.56$$

**Le pas dentaire statorique en mm**

$$tz1 := \frac{\pi \cdot D1}{Z1} \quad tz1 = 11.306 \quad (\text{mm})$$

**Angle électrique entre deux encoches voisines**

$$\gamma := p \cdot \frac{360}{Z1} \quad \gamma = 20$$

**la zone de phase**

$$\alpha := q1 \cdot \gamma \quad \alpha = 60$$

**Coefficient de distribution  $kd1$** 

$$kd1 := \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m1}\right)}{q1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot q1 \cdot m1}\right)} \quad kd1 = 0.96$$

**Le pas polaire en nombre d'encoches**

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

**Le pas d'enroulement**

$$\varepsilon r1 := \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} \quad \varepsilon r := \varepsilon r1_0$$

$$y1 := \frac{Z1}{2 \cdot p} - \varepsilon r \quad y1 = 9 \text{ encoches}$$

**rapport de raccourcissement  $\beta$** 

$$\beta := \frac{y1}{\tau p} \quad \beta = 1$$

**Coefficient de raccourcissement polaire**  $kr1$

$$kr1 := \sin\left(\frac{\beta \cdot \pi}{2}\right) \quad kr1 = 1$$

$Ken1$ : le facteur de bobinage de l'enroulement statorique

$$Ken1 := kd1 \cdot kr1 \quad Ken1 = 0.96$$

**A1: la charge lineaire**

$A11 :=$

$$A11 = 189 \quad \left(\frac{A}{cm}\right)$$

$B_{\delta}$  induction dans l'entrefer

$B :=$

$$B_{\delta 1} := B \cdot 10^{-3} \quad B_{\delta 1} = 0.9 \quad (T) \quad B_{\delta 1} = 0.9$$

$$l_{\delta 1} := \frac{8.62 \cdot 10^7 \cdot P_e}{n \cdot D1^2 \cdot A11 \cdot B_{\delta 1} \cdot Ken1} \quad l_{\delta 1} = 150.075 \quad (\text{mm})$$

$$l_{\delta} := 150 \quad (\text{mm})$$

### la tension simple

$$Un1 := \begin{pmatrix} 220 \\ 380 \\ 660 \end{pmatrix}$$

$$Un1 := Un1_1$$

$$Un1 = 380 \quad (\text{V})$$

### Nombre de voix parralleles

$$a1 := 1$$

### Courant nominale dans une phase

$$In1 := \frac{Pn \cdot 10^3}{m1 \cdot Un1 \cdot \cos(\phi_n) \cdot 1 \cdot \eta n1} \quad In1 = 6.472 \quad (\text{A})$$

### Le flux utile

$$\phi 1 := \frac{B_{\delta 1} \cdot D1 \cdot l_{\delta} \cdot 10^{-6}}{p} \quad \phi 1 = 0.0087 \quad (\text{Wb})$$

### Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche

$$K_e = 0.97$$

$$Ken1 = 0.96$$



$$W_{11} := \frac{K_e \cdot U_{n1} \cdot 50}{222 \cdot K_{en1} \cdot \phi_1 \cdot f_1} \quad W_{11} = 197.81 \quad (\text{spires})$$

$$N_{en1} := \frac{W_{11} \cdot a_1}{p \cdot q_1} \quad N_{en1} = 32.968 \quad (\text{Conducteurs})$$

$$\text{round}(N_{en1}) = 33 \quad (\text{spires})$$

### Nombre de spires d'une voie parallèle

$$W_1 := \frac{\text{round}(N_{en1}) \cdot p \cdot q_1}{a_1} \quad W_1 = 198 \quad \text{spires}$$

### Le flux utile

$$\phi := \phi_1 \cdot \frac{W_{11}}{W_1} \quad \phi = 0.0087 \quad (\text{Wb})$$

### L'induction dans l'entrefer

$$B_\delta := B_{\delta 1} \cdot \frac{W_{11}}{W_1} \quad B_\delta = 0.899 \quad (\text{T})$$

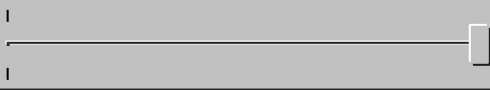
### La charge linéaire

$$A_1 := \frac{10 \cdot \text{round}(N_{en1}) \cdot Z_1 \cdot I_{n1}}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1} \quad A_1 = 188.901 \quad \left( \frac{\text{A}}{\text{cm}} \right)$$

## Enroulement statorique

### densité de courant statorique

j11 :=



$$j1 := j11 \cdot 10^{-2}$$

$$j1 = 5.32$$

$$j1=5.32$$

$$\left( \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right)$$

### la section effective

$$\text{Seff1} := \frac{\text{In1}}{\text{al} \cdot j1}$$

$$\text{Seff1} = 1.217$$

$$\left( \text{mm}^2 \right)$$

### La section elementaire

$$\text{Nel1} := 2$$

$$\text{Sel11} := \frac{\text{Seff1}}{\text{Nel1}}$$

$$\text{Sel11} = 0.608$$

$$\text{Sel1} := 0.6082 \quad \left( \text{mm}^2 \right)$$

$$\text{dnu} := 0.88 \quad (\text{mm})$$

$$\text{dis} := 0.952 \quad (\text{mm})$$

## Calcul de la tole magnetique statorique

### induction dans la culasse statorique

$$\text{Bc1} := 1.586 \quad (\text{T})$$

**induction dans la dent statorique**

$$Bz1 := 1.644 \quad (\text{T})$$

**le pas dentaire en mm**

$$t1 := \frac{\pi \cdot D1}{Z1} \qquad t1 = 11.306 \quad (\text{mm})$$

**La hauteur du dos du stator**

$$Kfer := 0.97$$

$$hc1 := \frac{\phi \cdot 10^6}{2 \cdot l_s \cdot Kfer \cdot Bc1} \qquad hc1 = 18.931 \quad (\text{mm})$$

**La largeur de la dent statorique**

$$bz1 := \frac{t1 \cdot B_s^2}{Kfer \cdot Bz1} \qquad bz1 := 6.376 \quad (\text{mm})$$

**La hauteur de la dent du stator**

$$hz1 := 0.5 \cdot (Dex1 - D1) - hc1^2 \qquad hz1 := 16.291 \quad (\text{mm})$$

**La hauteur de la clavette**

$$hk1 := 0 \quad (\text{mm})$$

$$hf1 := 0.8 \quad (\text{mm})$$

**La hauteur de l'encoche statorique**

$$henc1 := hz1 - (hk1 + hf1) \qquad henc1 = 15.491 \quad (\text{mm})$$

**La largeur maximale de l'encoche**

$$r := 3.566 \quad (\text{mm})$$

$$b1 := \frac{\pi \cdot [D1 + 2 \cdot (\text{henc1} - r + \text{hfl})]}{Z1} - \text{bz1} \quad \blacksquare \quad b1 := 7.132 \quad (\text{mm})$$

**La largeur minimale de l'encoche (b2)**

$$\text{bf1} := 3.93 \quad (\text{mm})$$

$$b2 := \frac{\pi \cdot [D1 + 2 \cdot (\text{hz1} - \text{henc1})]}{Z1} - \text{bz1} \quad \blacksquare \quad b2 := 4.93 \quad (\text{mm})$$

**La section de l'encoche**

$$h1 := \text{henc1} - \frac{b1}{2} \quad h1 = 11.925 \quad (\text{mm})$$

$$\text{Senc1} := \frac{b1 + b2}{2} \cdot (h1) + \frac{\pi \cdot b1^2}{8} \quad \text{Senc1} = 91.894 \quad (\text{mm}^2)$$

$$\text{bis} := 0.3 \quad (\text{mm})$$

$$\text{Sis} := \left[ \pi \cdot \frac{b1}{2} + 2 \cdot h1 + (b2) \right] \cdot \text{bis} \quad \text{Sis} = 11.995 \quad (\text{mm}^2)$$

**La section de l'encoche occupee par l'enroulement**

$$\text{See1} := \text{Senc1} - \text{Sis} \quad \blacksquare \quad \text{See1} := 82.6 \quad (\text{mm}^2)$$

**Coefficient de remplissage de l'encoche**

$$\text{KR}_a := \frac{\text{Nel1} \cdot \text{round}(\text{Nen}_1) \cdot \text{dis}^2}{\text{See1}} \quad \text{KR}_a = 0.724$$

### Calcul du noyau rotorique

#### Entrefer

$$\delta_e := 0.28 \quad (\text{mm})$$

#### Diamètre extérieur du rotor

$$D_2 := D_1 - 2 \cdot \delta_e \quad D_2 = 129 \quad (\text{mm})$$

#### La longueur virtuelle de l'induit

$$l_2 := l_\delta \quad l_2 = 150 \quad (\text{mm})$$

#### Le diamètre de l'arbre

$$D_{2ar} := 48 \quad (\text{mm})$$

#### Le pas polaire en mm

$$\tau_{p2} := \frac{\pi \cdot D_2}{2 \cdot p} \quad \tau_{p2} = 101.316 \quad (\text{mm})$$

#### Le pas dentaire en mm

$$t_2 := \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad t_2 = 14.474 \quad (\text{mm})$$

#### La hauteur de la culasse rotorique

$$B_{c2} := 1.669 \quad (\text{T})$$

$$h_{c2} := \frac{\phi \cdot 10^6}{2 \cdot K_{fer} \cdot l_2 \cdot B_{c2}} \quad h_{c2} = 17.989 \quad (\text{mm})$$

**La hauteur de la dent rotorique**

$$D_{\text{int}} := 48 \quad (\text{mm})$$

$$hz_2 := (D_2 - D_{\text{int}}) \cdot 0.5 - hc_2 \quad hz_2 = 22.511 \quad (\text{mm})$$

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

$$Bz_2 := 1.67 \quad (\text{T})$$

$$bz_2 := \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{\text{fer}} \cdot Bz_2} \quad bz_2 = 8.034 \quad (\text{mm})$$

**Rayon maximal de l'encoche**

$$hf_2 := 0.419 \quad (\text{mm})$$

$$r_1 := \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot hf_2) - Z_2 \cdot bz_2}{(\pi + Z_2) \cdot 2} \quad r_1 = 2.853 \quad (\text{mm})$$

**Rayon minimal de l'encoche**

$$r_2 := \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot hz_2) - Z_2 \cdot bz_2}{(Z_2 - \pi) \cdot 2} \quad r_2 := 0.9 \quad (\text{mm})$$

**La cage rotorique:****Section de la barre:**

$$h_2 := hz_2 - hf_2 - (r_1 + r_2) \quad h_2 = 18.339 \quad (\text{mm})$$

$$henc_2 := h_2 + (r_1 + r_2) \quad henc_2 = 22.092 \quad (\text{mm})$$

$$Sen_2 := (r_1^2 + r_2^2) \cdot \frac{\pi}{2} + 2(r_1 + r_2) \cdot h_2 \cdot 0.5 \quad Sen_2 = 82.881 \quad (\text{mm}^2)$$

**Dimensionnement de l'anneau de court circuit****La hauteur de l'anneau**

$$h_{an} := (1.1 \div 1.25) \cdot h_z^2$$

$$h_{an} := 1.1 \cdot h_z^2$$

$$h_{an} = 24.762 \quad (\text{mm})$$

**La section de l'anneau**

$$S_{an} := (0.35 \div 0.45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_{en2}}{2 \cdot p}$$

$$S_{an} := 0.40 \cdot \frac{Z_2 \cdot S_{en2}}{2 \cdot p}$$

$$S_{an} = 232.068 \quad (\text{mm}^2)$$

**La largeur de l'anneau**

$$l_{an} := \frac{S_{an}}{h_{an}}$$

$$l_{an} = 9.372 \quad (\text{mm})$$

**Diametre moyen interieur de l'anneau**

$$D_{an} := D_2 - h_{an}$$

$$D_{an} = 104.238 \quad (\text{mm})$$

**CALCUL DU CIRCUIT MAGNETIQUE****L'entrefer**

$$k_{\delta 1} := 1 + \frac{b_{fl}}{t_1 - b_{fl} + \frac{5 \cdot \delta_e \cdot t_1}{b_{fl}}}$$

$$k_{\delta 1} = 1.345$$

$$k_{\delta 2} := 1$$

$$k_{\delta 2} = 1$$

$$k_{\delta} := k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2}$$

$$k_{\delta} = 1.345$$

**force magnetomotrice dans l'entrefer**

$$F_{\delta} := 0.8 \cdot B_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot \delta \cdot 10^3 \quad F_{\delta} = 270.816 \quad (\text{A})$$

**champ magnetique dans la dent du stator**

$$H_{z1} := 962 \quad \left( \frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

**Fmm dans la dent du stator**

$$F_{z1} := H_{z1} \cdot h_{z1} \cdot 10^{-3} \quad F_{z1} = 15.672 \quad (\text{A})$$

**Fmm dans la culasse:****La longueur moyenne des lignes dans la culasse statorique:**

$$L_{c1} := \frac{\pi \cdot (D_{ex1} - h_{c1})}{2 \cdot p} \quad L_{c1} = 142.212 \quad (\text{mm})$$

**induction  $B_{c1}$** 

$$B_{c1} = 1.586 \quad (\text{T})$$

**champ magnetique dans la culasse statorique**

$$H_{c1} := 726 \quad \left( \frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

$$F_{c1} := H_{c1} \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3} \quad F_{c1} = 103.246 \quad (\text{A})$$



**ROTOR****induction**  $B_{z2}$ 

$$B_{z2} = 1.67 \quad (\text{T})$$

**champ magnetique dans la dent du rotor**

$$H_{z2} := 1050 \quad \left( \frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

**Fmm dans la dent du rotor**

$$F_{z2} := H_{z2} \cdot h_{z2} \cdot 10^{-3} \qquad F_{z2} = 23.636 \quad (\text{A})$$

**Fmm dans la culasse rotorique****induction**

$$B_{c2} = 1.669 \quad (\text{T})$$

**champ magnetique dans la culasse du rotor**

$$H_{c2} := 1020 \quad \left( \frac{\text{A}}{\text{m}} \right) \qquad dk_2 := 0$$

$$L_{c2} := \frac{\pi}{4 \cdot p} \cdot \left( D_{2ar} + hc_2 + \frac{4}{3} \cdot dk_2 \right) \qquad L_{c2} = 25.914 \quad (\text{mm})$$

$$F_{c2} := H_{c2} \cdot L_{c2} \cdot 10^{-3} \qquad F_{c2} = 26.432 \quad (\text{A})$$

**Fmm totale par paire de pole**

$$\Sigma F := 2(F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2} \qquad \Sigma F = 749.926 \quad (\text{A})$$

**Coefficient de saturation de la machine**

$$k_{\mu} := \frac{\Sigma F}{2F_{\delta}} \qquad k_{\mu} = 1.385$$

**Le courant magnetisant**

$$I_{\mu} := \frac{1.11p \cdot \Sigma F}{m1 \cdot W1 \cdot Ken1} \quad I_{\mu} = 2.92 \quad (\text{A})$$

**Le courant en U.R**

$$I_{ur} := \frac{I_{\mu}}{In1} \quad I_{ur} = 0.451$$

**La fmm**

$$E := K_e \cdot Un1 \quad E = 368.6 \quad (\text{V})$$

**La reactance de magnetisation**

$$X_m := \frac{K_e \cdot Un1}{I_{\mu}} \quad X_m = 126.226 \quad (\text{ohm})$$

**La reactance de magnetisation UR**

$$X_{mur} := \frac{X_m \cdot In1}{Un1} \quad X_{mur} = 2.15 \quad (\text{ohm})$$

**Paramètres du stator****Résistance active**

$$T_{\text{cu}} := 20 \quad \text{C} \quad \rho_{\text{cu}} := 0.0172 \cdot 10^{-6} \quad (\text{ohm} \cdot \text{m}) \quad y1_{\text{moy}} := 9$$

$$b1_{\text{moy}} := \frac{\pi \cdot (D1 + hz1) \cdot y1_{\text{moy}}}{Z1} \quad b1_{\text{moy}} = 114.551 \quad (\text{mm})$$

$$Lf1 := (1.16 + 0.14 \cdot p) \cdot b1_{\text{moy}} + 15 \quad Lf1 = 179.954 \quad (\text{mm})$$

$$Lw1 := 2 \cdot (l_{\delta} + Lf1) \quad Lw1 = 659.907 \quad (\text{mm})$$

$$R1 := \rho_{cu} \cdot \frac{W1 \cdot Lw1 \cdot 10^3}{a1 \cdot Nel1 \cdot Sel1} \quad R1 = 1.848 \quad (\text{ohm})$$

**Résistance active, ur**

$$R1_{ur} := R1 \cdot \frac{In1}{Un1} \quad R1_{ur} = 0.031$$

**Réactance de fuite d'encoche**

$$K_{\beta 1} := 1 \quad K_{\beta 11} := 1$$

$$hf1 = 0.8 \quad (\text{mm}) \quad hz1 = 16.291 \quad (\text{mm})$$

$$\lambda_{enc1} := \frac{h1}{3 \cdot b2} \cdot K_{\beta 1} + \left( 0.785 \cdot \frac{bfl}{2 \cdot b2} + \frac{bis}{b2} + \frac{hfl}{bfl} \right) \cdot K_{\beta 11} \quad \lambda_{enc1} = 1.384$$

$$X_{enc1} := 1.58 \cdot fl \cdot l_{\delta} \cdot W1^2 \cdot \frac{\lambda_{enc1}}{p \cdot q1 \cdot 10^8} \quad X_{enc1} = 1.071 \quad (\text{ohm})$$

**La réactance de fuite différentielle**

$$k_{de1} := 0.0141$$

$$k_{f1} := 1 - \left( \frac{0.033 \cdot bfl^2}{\delta e \cdot t1} \right) \quad k_{f1} = 0.839$$

$$k_{rr1} := 0.91$$

$$\lambda_{d1} := \frac{0.9 \cdot t1 \cdot (q1 \cdot Ken1)^2 \cdot k_{rr1} \cdot k_{f1} \cdot k_{de1}}{k_{\delta} \cdot \delta e} \quad \lambda_{d1} = 2.412$$

$$X_{d1} := 1.58 \cdot fl \cdot l_{\delta} \cdot W1^2 \cdot \frac{\lambda_{d1}}{p \cdot q1 \cdot 10^8} \quad X_{d1} = 1.868 \quad (\text{ohm})$$

**La réactance de fuite frontale**

$$\tau_1 := \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} \quad \tau_1 = 101.756 \quad (\text{mm})$$

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

$$\lambda_{f1} := 0.34 \cdot \frac{q_1 \cdot (L_{f1} - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau_1)}{l_\delta} \quad \lambda_{f1} = 0.781$$

$$X_{f1} := \frac{1.58 \cdot f_1 \cdot l_\delta \cdot W_1^2}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \cdot \lambda_{f1} \quad X_{f1} = 0.605 \quad (\text{ohm})$$

**reactance inductive du dispersion de l'enroulement statorique**

$$\lambda_1 := \lambda_{enc1} + \lambda_{d1} + \lambda_{f1} \quad \lambda_1 = 4.577$$

$$X_1 := 1.58 \cdot f_1 \cdot l_\delta \cdot W_1^2 \cdot \frac{\lambda_1}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \quad X_1 = 3.544 \quad (\text{ohm})$$

**La reactance totale en U R**

$$X_{1ur} := X_1 \cdot \frac{I_{n1}}{U_{n1}} \quad X_{1ur} = 0.06$$

**coefficient de dispersion magnetique du stator**

$$\sigma_\mu := \frac{X_1}{X_m} \quad \sigma_\mu = 0.028$$

**force electromagnetique a vide Eo**

$$E_o := \frac{U_{n1}}{1 + \sigma_\mu} \quad E_o = 369.623 \quad (\text{V})$$

### Paramètres du rotor

#### Résistance de la barre

$$T := 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \rho_{AL}(T) := 36.6 \cdot 10^{-9} \quad (\text{Ohm} \cdot \text{m})$$

$$S_b := 82.282 \quad (\text{mm}^2)$$

$$R_b := \rho_{AL}(T) \cdot \frac{12 \cdot (10^3)}{S_b} \quad R_b = 6.672 \times 10^{-5} \quad (\text{ohm})$$

#### Coefficient de réduction du courant de l'anneau au courant de la barre

$$K_{red} := 2 \cdot \sin\left(\frac{p \cdot \pi}{Z_2}\right) \quad K_{red} = 0.445$$

#### Résistance de l'anneau

$$R_{an} := \frac{\rho_{AL}(T) \cdot 2 \cdot \pi \cdot D_{an} \cdot 10^3}{Z_2 \cdot S_{an}} \quad R_{an} = 3.689 \times 10^{-6} \quad (\text{ohm})$$

#### Résistance de l'anneau ramené a la barre

$$R_{anram} := \frac{\rho_{AL}(T) \cdot 2 \cdot \pi \cdot D_{an} \cdot 10^3}{Z_2 \cdot S_{an} \cdot K_{red}^2} \quad R_{anram} = 1.863 \times 10^{-5} \quad (\text{ohm})$$

#### rapport des pas dentaires statorique et rotorique

$$\beta_{ob} := \frac{t_1}{t_2} \quad \beta_{ob} = 0.781$$

#### rapport des pas dentaires statorique et rotorique

$$\alpha_{ob} := 2 \cdot p \cdot \pi \cdot \frac{\beta_{ob}}{Z_2} \quad \alpha_{ob} = 0.351$$

**Coefficient d'obliquité des encoches rotoriques et statoriques**

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

**Coefficient de réduction de la résistance de l'enroulement du rotor à l'enroulement du stator**

$$k_{red1} := \frac{4 \cdot m1}{Z2} \left( \frac{W1 \cdot Ken1}{k_{ob}} \right)^2 \quad k_{red1} = 15637.357$$

**Résistance active de l'enroulement du rotor**

$$R2 := (R_b + R_{anram}) \quad R2 = 8.535 \times 10^{-5} \quad (\text{ohm})$$

**Résistance active de l'enroulement du rotor ramené à l'enroulement du stator**

$$R21 := k_{red1} \cdot (R2) \quad R21 = 1.335 \quad (\text{ohm})$$

**Résistance active de l'enroulement du rotor ramené à l'enroulement du stator en ur**

$$R21_{ur} := R21 \cdot \frac{I_{n1}}{U_{n1}} \quad R21_{ur} = 0.023$$

**Le courant dans la barre**

$$I_{n2} := \frac{2 \cdot W1 \cdot Ken1 \cdot P_n}{U_{n1} \cdot Z2} \cdot \frac{(0.2 + 0.8 \cdot \cos(\phi_n)) \cdot 10^3}{\eta_{n1} \cdot \cos(\phi_n)} \quad I_{n2} = 231.931 \quad (\text{A})$$

**Le courant dans l'anneau**

$$I_{an} := \frac{I_{n2}}{K_{red}} \quad I_{an} = 521.144 \quad (\text{A})$$

**La densite de courant dans l'anneau**

$$J_{an} := \frac{I_{an}}{S_{an}} \quad J_{an} = 2.246 \quad \left( \frac{A}{mm^2} \right)$$

**reactance de dispersion et permeance du rotor**

$$\lambda_{enc2} := \frac{h2 + 0.8 \cdot r2}{6 \cdot r1} \left( 1 - \frac{\pi \cdot r1^2}{2 \cdot S_b} \right)^2 + 0.66 \quad \lambda_{enc2} = 1.454$$

$$q2 := \frac{Z2}{2 \cdot p \cdot 3} \quad q2 = 2.333$$

$$kd2 := \frac{9.15}{100 \cdot \left( \frac{Z2}{6 \cdot p} \right)^2} \quad kd2 = 0.017$$

$$\lambda_{2d} := \frac{0.9 \cdot t2 \cdot \left( \frac{Z2}{6 \cdot p} \right)^2 \cdot kd2}{\delta e \cdot k\delta} \quad \lambda_{2d} = 3.166$$

$$\lambda_{f2} := \frac{2.3 \cdot Dan}{Z2 \cdot l_{\delta} \cdot K_{red}^2} \cdot \log \left[ \frac{4.7 \cdot Dan}{2 \cdot (h_{an} + l_{an})} \right] \quad \lambda_{f2} = 0.247$$

$$\lambda_{ob} := \frac{t2 \cdot \beta_{ob}}{9.5 \cdot \delta e \cdot k\delta \cdot k_{\mu}} \quad \lambda_{ob} = 2.283$$

$$\lambda_2 := \lambda_{enc2} + \lambda_{2d} + \lambda_{f2} + \lambda_{ob} \quad \lambda_2 = 7.15$$

$$X_2 := 7.9 \cdot f1 \cdot l_2 \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} \quad X_2 = 4.236 \times 10^{-4} \quad (\text{ohm})$$

**reactance de dispersion du rotor ramenée au stator**

$$X_{21} := k_{red1} \cdot X_2$$

$$X_{21} = 6.624 \quad (\text{ohm})$$

**reactance de dispersion du rotor ramenée au rotor en U R**

$$X_{21ur} := X_{21} \cdot \frac{I_{n1}}{U_{n1}}$$

$$X_{21ur} = 0.113 \quad (\text{ohm})$$

**Coefficient de dispersion statorique**

$$\sigma_1 := \frac{X_1}{X_m} \quad \sigma_1 = 0.028$$

**Coefficient des résistances statoriques**

$$m_T := 1.22$$

$$\rho_1 := \frac{R_1 \cdot m_T}{X_1 + X_m} \quad \rho_1 = 0.017$$

**Les Résistances transformées**

$$R_{11} := m_T \cdot R_1 \quad R_{11} = 2.254 \quad (\text{ohm})$$

$$R_{211} := m_T \cdot R_{21} \cdot (1 + \sigma_1)^2 \cdot (1 + \rho_1^2) \quad R_{211} = 1.721 \quad (\text{ohm})$$

$$X_{11} := X_1 \cdot (1 + \sigma_1) \cdot \left(1 + R_1 \cdot \frac{\rho_1}{X_1}\right) \quad X_{11} = 3.676 \quad (\text{ohm})$$

$$X_{211} := m_T \cdot X_{21} \cdot (1 + \sigma_1)^2 \cdot (1 + \rho_1^2) \quad X_{211} = 8.545 \quad (\text{ohm})$$



### Régime à vide et nominal, Calcul des pertes

#### La composante réactive du courant statorique pour une vitesse synchrone

$$I_{0r} := \frac{U_{n1}}{X_m \cdot (1 + \sigma_1) \cdot (1 + \rho_1^2)} \quad I_{0r} = 2.927 \quad (\text{A})$$

#### Pertes électriques dans l'enroulement statorique pour la vitesse synchrone

$$P_{e1} := m_1 \cdot I_{0r}^2 \cdot R_{11} \cdot (1 + \rho_1^2) \quad P_{e1} = 57.966 \quad (\text{w})$$

#### La masse des dents pour notre type d'encoche

$$m_{z1} := \left[ (Z_1 \cdot b_{z1} \cdot h_{z1}) + \left( r^2 - r^2 \cdot \frac{\pi}{4} \right) \cdot 2 \cdot Z_1 \right] \cdot 7.8 \cdot K_{\text{fer}} \cdot 10^{-6} \cdot l_{\delta}$$

$$m_{z1} = 4.467 \quad (\text{Kg})$$

#### Pertes magnétiques dans les dents statoriques

$$P_{z1} := 4.4 \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1} \quad P_{z1} = 53.119 \quad (\text{W})$$

#### La masse du dos du stator pour une encoche

$$m_{c1} := 7.8 \cdot \pi \cdot \left[ \frac{D_{ex} I^2}{4} - \frac{(D_1 + 2 \cdot h_{z1})^2}{4} \right] \cdot l_{\delta} \cdot K_{\text{fer}} \cdot 10^{-6} \quad m_{c1} = 12.22 \quad (\text{Kg})$$

Pertes magnétiques dans le dos du stator

$$P_{c1} := 4.4 \cdot B_{c1}^2 \cdot m_{c1} \qquad P_{c1} = 135.252 \quad (\text{W})$$

**La somme des pertes dans le noyau du stator y compris les pertes supplémentaires**

$$P_{c\Sigma} := P_{z1} \cdot \left[ 1 + 2 \cdot (k_{\delta} - 1) \cdot \left( \frac{t_1}{10} \right)^{0.5} \right] + P_{c1} \qquad P_{c\Sigma} = 227.301 \quad (\text{W})$$

**Pertes mécaniques pour IP44 et IC0151 , pour 2P=4**

$$k_{m0} := 1$$

$$P_{m\Sigma} := k_{m0} \cdot \left( \frac{n}{1000} \right)^2 \cdot \left( \frac{D_{ex1}}{100} \right)^4 \qquad P_{m\Sigma} = 36 \quad (\text{W})$$

**Pertes supplémentaires en régime nominale**

$$P_{sno} := 0.005 \cdot P_n \cdot \frac{10^3}{\eta_{n1}} \qquad P_{sno} = 31.357 \quad (\text{W})$$

**Composante active du courant à vide (A)**

$$P_{a10} := R_1 \cdot m_1 \cdot I_{\mu}^2$$

$$I_{0a} := \frac{P_{a10} + P_{c\Sigma} + P_{m\Sigma} + P_{sno}}{m_1 \cdot U_{n1}} \qquad I_{0a} = 0.3 \quad (\text{A})$$

**Le courant à vide**

$$I_0 := \sqrt{I_{0r}^2 + I_{0a}^2} \qquad I_0 = 2.943 \quad (\text{A})$$

**Facteur de puissance à vide**

$$\cos\phi_0 := \frac{I_{0a}}{I_0} \qquad \cos\phi_0 = 0.102$$

**Paramètres en régime nominal****Résistance active en CC**

$$R_{cc} := R_1 + R_{211} \qquad R_{cc} = 3.569 \quad (\text{ohm})$$

**Réactance en CC**

$$X_{cc} := X_1 + X_{211} \qquad X_{cc} = 12.088 \quad (\text{ohm})$$

**Impédance Zcc**

$$Z_{cc} := \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} \qquad Z_{cc} = 12.604 \quad (\text{ohm})$$

**Puissance mécanique du moteur**

$$P_{méc} := P_n \cdot 10^3 + P_{m\Sigma} + P_{snc} \qquad P_{méc} = 5.567 \times 10^3 \quad (\text{W})$$

**Résistance équivalente du schéma équivalent**

$$R_n := \frac{m_1 \cdot U_n I^2}{2 \cdot P_{méc}} - R_{cc} + \sqrt{\left( \frac{m_1 \cdot U_n I^2}{2 \cdot P_{méc}} - R_{cc} \right)^2 - Z_{cc}^2} \qquad R_n = 68.348 \quad (\text{ohm})$$

**Empédence totale**

$$Z_n := \sqrt{(R_n + R_{cc})^2 + X_{cc}^2} \qquad Z_n = 72.926 \quad (\text{ohm})$$

**Vérification de calcul de Rn**

$$\frac{R_n}{Z_n^2} = 0.013$$

$$\frac{P_{méc}}{m_1 \cdot U_{n1}^2} = 0.013$$

**Glissement**

$$g_n := \frac{1}{1 + \frac{R_n}{R_{211}}}$$

$$g_n = 0.025$$

**Vitesse de rotation du moteur**

$$n_2 := n \cdot (1 - g_n)$$

$$n_2 = 1.463 \times 10^3 \quad \left( \frac{\text{trs}}{\text{min}} \right)$$

**Composante active du courant statorique pour une rotation synchrone**

$$I_{ca} := \frac{P_{e1} + P_{c\Sigma} + P_{m\Sigma} + P_{sno}}{m_1 \cdot U_{n1}}$$

$$I_{ca} = 0.309 \quad (\text{A})$$

**Courant du rotor**

$$I_{211} := \frac{U_{n1}}{Z_n}$$

$$I_{211} = 5.211 \quad (\text{A})$$

**Courant du stator, composante active et réactive**

$$I_{a1} := I_{ca} + I_{211} \cdot \left[ \frac{R_n + R_{cc}}{Z_n} \cdot \frac{(1 - \rho_1)^2}{(1 + \rho_1)^2} + \frac{X_{cc} \cdot 2\rho_1}{Z_n \cdot (1 + \rho_1^2)} \right] \quad I_{a1} = 5.133 \quad (\text{A})$$

$$I_{r1} := I_{0r} + I_{211} \cdot \frac{X_{cc}}{Z_n} \cdot \left[ \frac{(1 - \rho_1)^2}{(1 + \rho_1)^2} - \frac{R_n + R_{cc}}{Z_n} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right] \quad I_{r1} = 3.704 \quad (\text{A})$$

$$I_1 := \sqrt{I_{a1}^2 + I_{r1}^2} \quad I_1 = 6.33 \quad (\text{A})$$

$$\text{Cos}\phi := \frac{I_{a1}}{I_1} \quad \text{Cos}\phi = 0.811$$

**Charge lineaire nominale**

$$A_n := \frac{10 \cdot I_1 \cdot \text{round}(N_{en1})}{a1 \cdot t1} \quad A_n = 184.746 \quad \left( \frac{\text{A}}{\text{cm}} \right)$$

**Densité nominale statorique**

$$j_{1n} := \frac{I_1}{N_{e1} \cdot S_{e11}} \quad j_{1n} = 5.203 \quad \left( \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right)$$

**Charge lineaire nominale rotorique**

$$A_2 := \frac{A_n \cdot I_{211} \cdot (1 + \sigma_1) \cdot \sqrt{1 + \rho_1^2} \cdot \text{Ken1}}{I_1 \cdot \text{Ken2} \cdot k_{ob}} \quad \text{Ken2} := 1 \quad A_2 = 150.866 \quad \left( \frac{\text{A}}{\text{cm}} \right)$$

**Courant de la barre rotorique**

$$I_b := I_{211} \cdot \frac{2 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot \text{Ken1} \cdot (1 + \sigma_1) \cdot \sqrt{1 + \rho_1^2}}{Z_2 \cdot k_{ob}} \quad I_b = 219.307 \quad (\text{A})$$

**Densité du courant de la barre**

$$j_b := \frac{I_b}{S_{en2}} \quad j_b = 2.646 \quad \left( \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right)$$

**Courant dant la bague**

$$I_{\text{bag}} := \frac{I_b}{K_{red}} \quad I_{\text{bag}} = 492.779 \quad (\text{A})$$

**Pertes électriques dans le stator**

$$P_{\acute{e}1} := m1 \cdot I_1^2 \cdot R11$$

$$P_{\acute{e}1} = 270.919 \quad (\text{W})$$

$$P_{\acute{e}2} := m1 \cdot I_{211}^2 \cdot R211$$

$$P_{\acute{e}2} = 140.221 \quad (\text{W})$$

**La somme des pertes**

$$P_{\Sigma} := P_{\acute{e}1} + P_{\acute{e}2} + P_{c\Sigma} + P_{m\Sigma} + P_{sno}$$

$$P_{\Sigma} = 705.798 \quad (\text{W})$$

**Puissance absorbée**

$$P1 := P_n \cdot 10^3 + P_{\Sigma}$$

$$P1 = 6.206 \times 10^3 \quad (\text{W})$$

**Rendement**

$$\eta_n := 1 - \frac{P_{\Sigma}}{P1}$$

$$\eta_n = 0.886$$

**Verification**

$$P1 := m1 \cdot I_{a1} \cdot U_n$$

$$P1 = 5.852 \times 10^3 \quad (\text{W})$$

$$P2 := m1 \cdot I_1 \cdot U_n \cdot \eta_n \cdot \cos\phi$$

$$P2 = 5.186 \times 10^3 \quad (\text{W})$$

## Paramètres de démarrage

### Profondeur de pénétration

$$gd := 1 \qquad hb := henc2 \qquad hb = 22.092$$

Coefficient qui depend de la valeur de  $\xi$

$$\varphi := 0.653$$

$$\xi := 0.064 \cdot hb \cdot \sqrt{gd}$$

$$hpp := \frac{hb}{1 + \varphi} \qquad hpp = 13.365$$

### La largeur à limite de pénétration

$$d21 := 5.687 \quad (\text{mm}) \qquad d22 := 1.8 \quad (\text{mm})$$

$$bpp := d21 - \left[ \left( \frac{d21 - d22}{h2} \right) \cdot \left( hpp - \frac{d21}{2} \right) \right] \qquad bpp = 3.457 \quad (\text{mm})$$

### La section de la barre pénétrée par le courant de démarrage

$$Sbdem := \left[ \frac{\pi \cdot (d21)^2}{8} \right] + \left[ 0.5 \cdot (d21 + bpp) \cdot hpp - 0.5 \cdot d21 \right]$$

$$Sbdem = 70.961 \quad (\text{mm})$$

**La résistance de la barre au démarrage**

$$C1 := 1 + \frac{X1}{Xm} \quad C1 = 1.028$$

$$kdep := \frac{Sb}{Sbdem} \quad kdep = 1.16$$

$$Rbdem := kdep \cdot Rb \quad Rbdem = 7.737 \times 10^{-5}$$

$$Ranramb := \frac{Ran}{Kred^2} \quad Ranramb = 1.863 \times 10^{-5}$$

$$R2demram := kred1 \cdot (Ranramb + Rbdem) \quad R2demram = 1.501$$

$$Reqdem := C1 \cdot R1 + C1^2 \cdot R2demram \quad Reqdem = 3.486$$

**Réactance équivalente au démarrage**

$$Kv := 0.0825 \quad k1\beta := 1$$

$$\lambda_{en1var} := \left[ \left( \frac{3 \cdot hk1}{b2 + bfl} \right) + \frac{hfl}{bfl} \right] \cdot k1\beta \quad \lambda_{en1var} = 0.204$$

$$\lambda1var := \lambda_{en1var} + \lambda d1 \quad \lambda1var = 2.616$$

$$\lambda2var := \lambda2d \quad \lambda2var = 3.166$$

$$Xvar := X11 \cdot \frac{\lambda1var}{\lambda1} + X211 \cdot \frac{\lambda2var}{\lambda2} \quad Xvar = 5.884$$

$$Xcon := X11 \cdot \frac{\lambda1 - \lambda1var}{\lambda1} + X211 \cdot \frac{\lambda2 - \lambda2var}{\lambda2} \quad Xcon = 6.336$$

$$Xeqdem := Xcon + Kv \cdot Xvar \quad Xeqdem = 6.822 \quad (\text{ohm})$$



**Courant rotorique correspondant au couple maximum**

$$\Delta := \frac{1.24 \cdot 10^3 \cdot \delta \cdot a1 \cdot [R11 + 2 \cdot (Xcon + 0.0825 \cdot Xvar) \cdot Xvar]}{\left[ 2 \cdot \text{round}(Nen_1) \cdot [R11^2 + (Xcon + 0.0825 \cdot Xvar)^2 + R11 \cdot (Xcon + 0.0825 \cdot Xvar)] \right]}$$

$$I11m2 := \frac{Un}{\sqrt{2 \cdot [R11^2 + (Xcon + 0.0825 \cdot Xvar)^2 + R11 \cdot (Xcon + 0.0825 \cdot Xvar)]}} - \Delta$$

$$I11m2 = 26.347 \quad (\text{A})$$

$$Zm := \frac{Un}{I11m2} \quad Zm = 14.423 \quad (\text{ohm})$$

$$Zinfi := 0.5 \cdot \left( \sqrt{R11^2 + 2 \cdot Zm^2} - R11 \right) \quad Zinfi = 7.72 \quad (\text{ohm})$$

$$Rm := Zinfi + R11 \quad Rm = 9.974 \quad (\text{ohm})$$

**Le couple utile sur l'arbre du moteur**

$$Cu := \frac{9.55 \cdot Pn \cdot 10^3}{n2} \quad Cu = 35.899 \quad (\text{Nm})$$

**Rapport du couple maximal sur le couple nominal**

$$\frac{Cmax}{Cu}$$

$$Cmaxno := \frac{m1 \cdot Un^2 (1 - gn)}{2 \cdot Rm \cdot Pn \cdot 10^3} \quad Cmaxno = 3.851$$

**Le couple maximal**

$$Cmax := Cu \cdot Cmaxno \quad Cmax = 138.259 \quad (\text{Nm})$$

**Le courant au démarrage**

$$I_{1d} := \frac{U_n}{\sqrt{X_{eqdem}^2 + R_{eqdem}^2}} \quad I_{1d} = 49.603 \quad (A)$$

$$\frac{I_{1d}}{I_1} = 7.837$$

**Le couple de demarage**

$$C_d := \frac{p \cdot m_1 \cdot U_n^2 \cdot R_{2demram}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot (R_{eqdem}^2 + X_{eqdem}^2)} \quad C_d = 70.538 \quad (Nm)$$

$$\frac{C_d}{C_u} = 1.965$$

**Calcul des caractéristiques de fonctionnement**

$$P_2 := 0, 0.05 \cdot P_n \dots 1.25 \cdot P_n$$

$$P_{sno1}(P_2) := 0.005 \cdot P_2 \cdot \frac{10^3}{\eta_{n1}}$$

$$P_{méc1}(P_2) := P_2 \cdot 10^3 + P_{m\Sigma} + P_{sno1}(P_2)$$

$$R_{n1}(P_2) := \frac{m_1 \cdot U_n^2}{2 \cdot P_{méc1}(P_2)} - R_{cc} + \sqrt{\left( \frac{m_1 \cdot U_n^2}{2 \cdot P_{méc1}(P_2)} - R_{cc} \right)^2 - Z_{cc}^2}$$

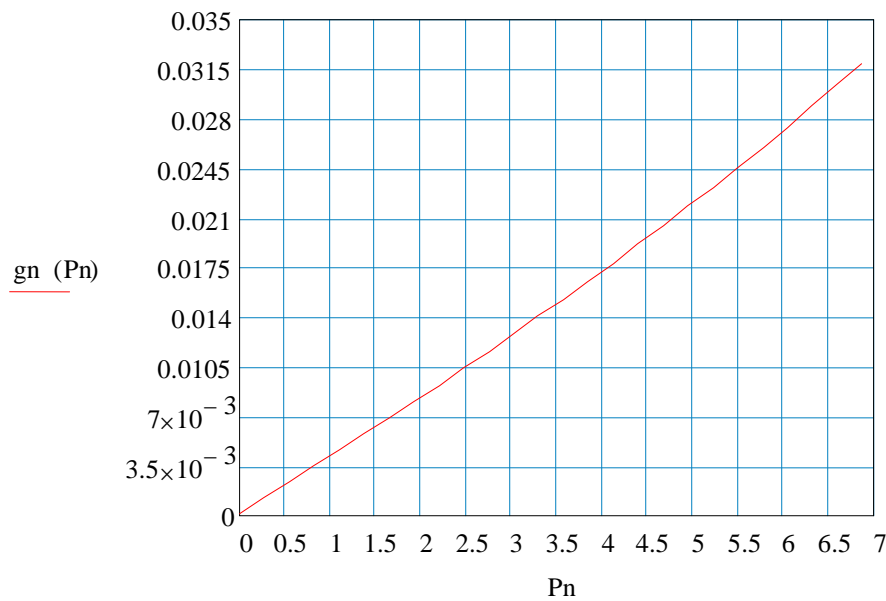
**Empédence totale**

$$Z_{n1}(P_2) := \sqrt{(R_{n1}(P_2) + R_{cc})^2 + X_{cc}^2}$$

**Vérification de calcul de Rn****Glissement**

$$gn1(P2) := \frac{1}{1 + \frac{Rn1(P2)}{R211}}$$

le glissement en fonction de la puissance nominale

**Courant du rotor**

$$I211(P2) := \frac{Un1}{Zn1(P2)}$$

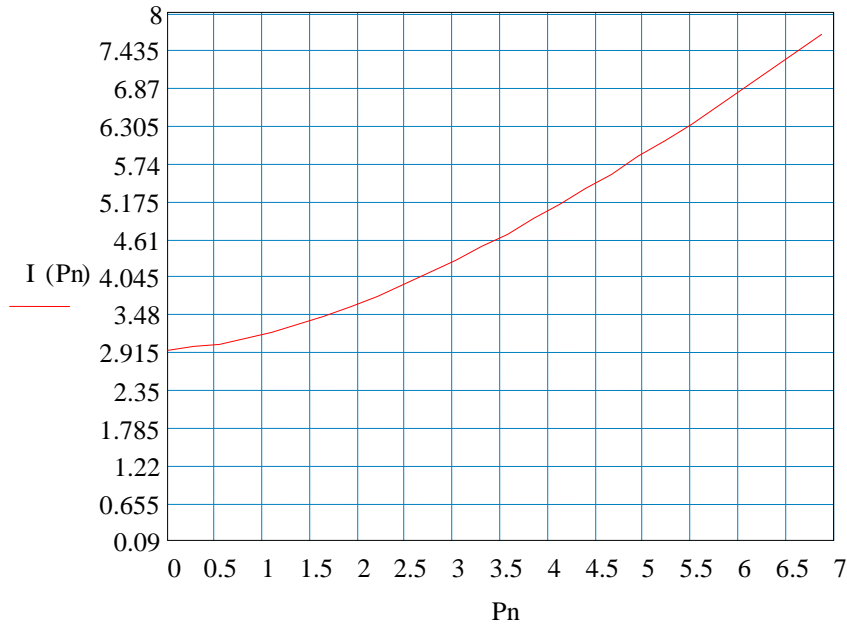
**Courant du stator, composante active et réactive**

$$Ia11(P2) := Ica + I211(P2) \cdot \left[ \frac{Rn1(P2) + Rcc}{Zn1(P2)} \cdot \frac{(1 - \rho1)^2}{(1 + \rho1)^2} + \frac{Xcc \cdot 2\rho1}{Zn1(P2) \cdot (1 + \rho1^2)} \right]$$

$$Ir11(P2) := I0r + I211(P2) \cdot \frac{Xcc}{Zn1(P2)} \cdot \left[ \frac{(1 - \rho1)^2}{(1 + \rho1)^2} - \frac{Rn1(P2) + Rcc}{Zn1(P2)} \cdot \frac{2 \cdot \rho1}{1 + \rho1^2} \right]$$

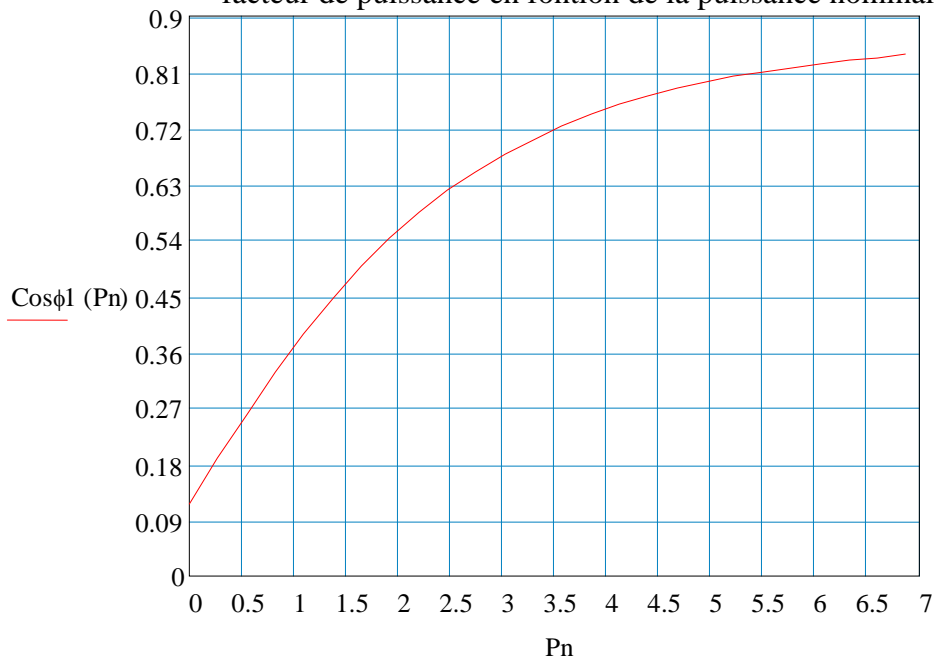
$$I11(P2) := \sqrt{Ia11(P2)^2 + Ir11(P2)^2}$$

Le courant absorbé en fonction de la puissance nominale



$$\text{Cos}\phi_1 (P_2) := \frac{I_{a11}(P_2)}{I_{11}(P_2)}$$

facteur de puissance en fonction de la puissance nominale



**Pertes électriques dans le stator**

$$P_{\acute{e}11}(P2) := m1 \cdot I_{11}(P2)^2 \cdot R11$$

$$P_{\acute{e}21}(P2) := m1 \cdot I_{a11}(P2)^2 \cdot R211$$

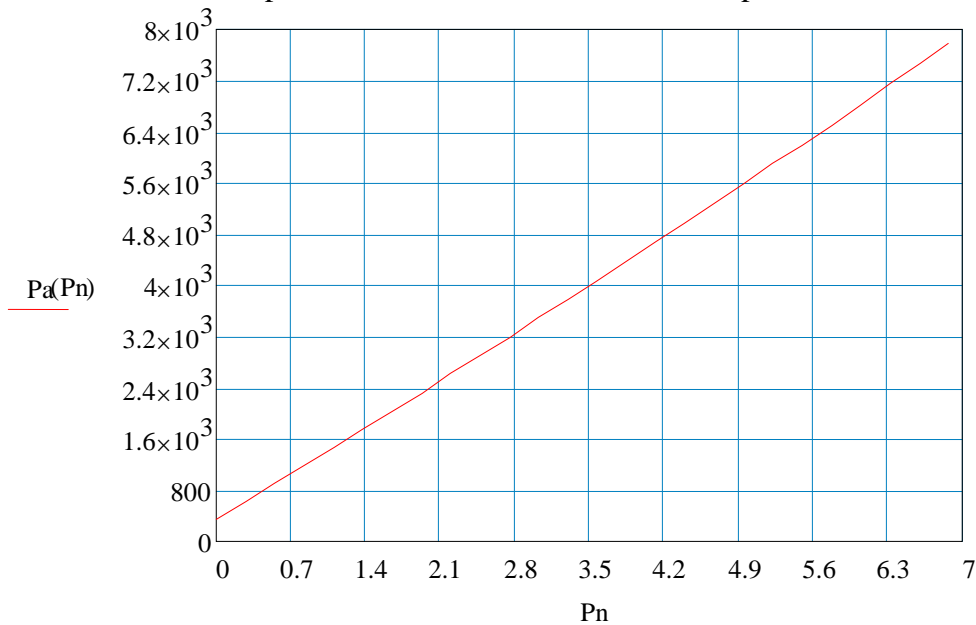
**La somme des pertes**

$$P_{\Sigma 1}(P2) := P_{\acute{e}11}(P2) + P_{\acute{e}21}(P2) + P_{c\Sigma} + P_{m\Sigma} + P_{sno}$$

**Puissance absorbée**

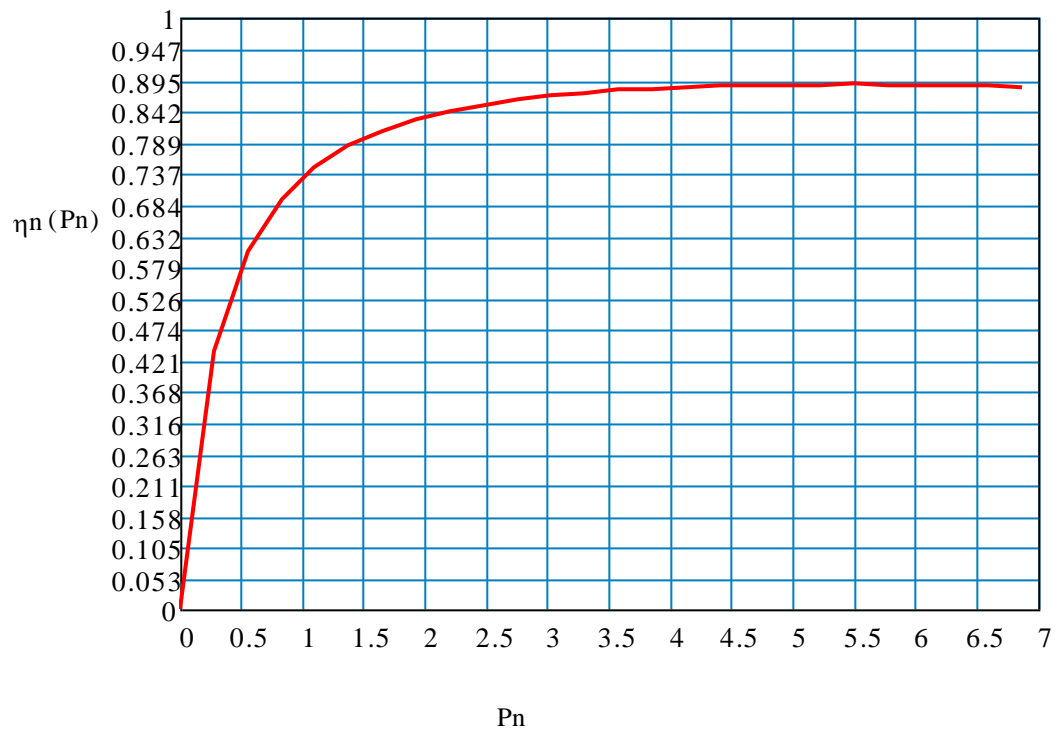
$$P_{11}(P2) := P2 \cdot 10^3 + P_{\Sigma 1}(P2)$$

la puissance absorbée en fonction de la puissance nominale



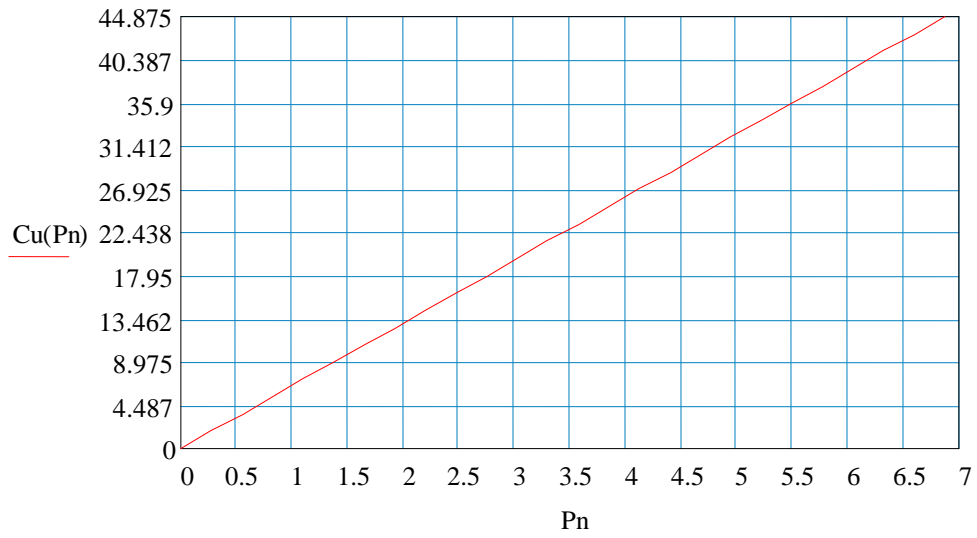
**Rendement en fonction de la puissance nominale**

$$\eta_{n11}(P2) := 1 - \frac{P_{\Sigma 1}(P2)}{P_{11}(P2)}$$



**Couple nominal en fonction de la puissance nominale**

$$\underline{\underline{Cu(P2)}} := \frac{9.55 \cdot P2 \cdot 10^3}{n2}$$



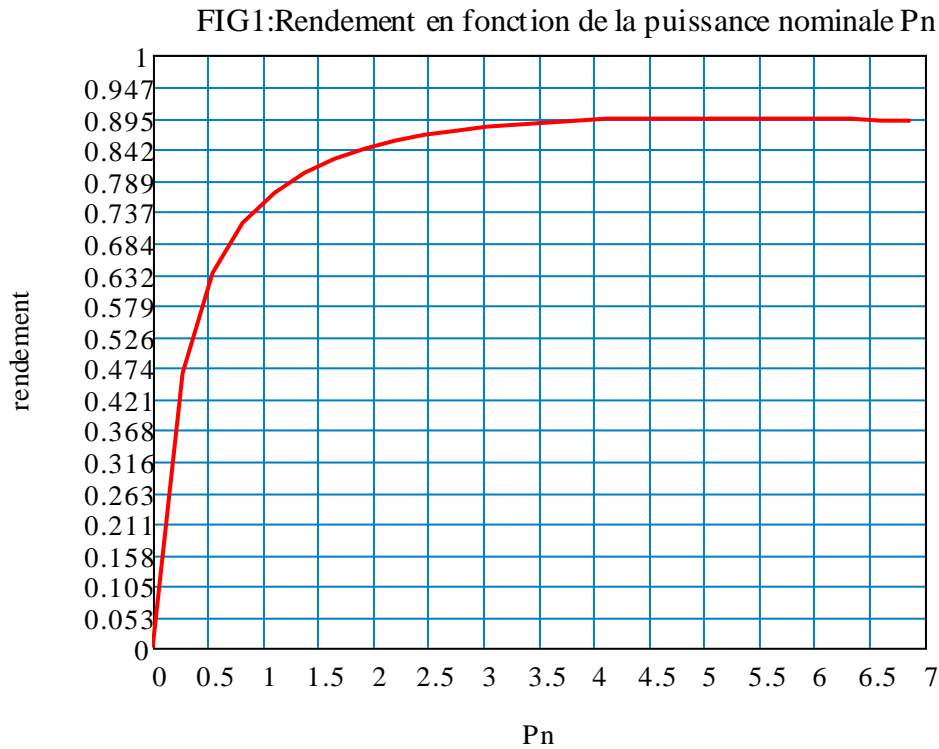
# ***Chapitre V***

**Comparaison et interprétation des résultats**



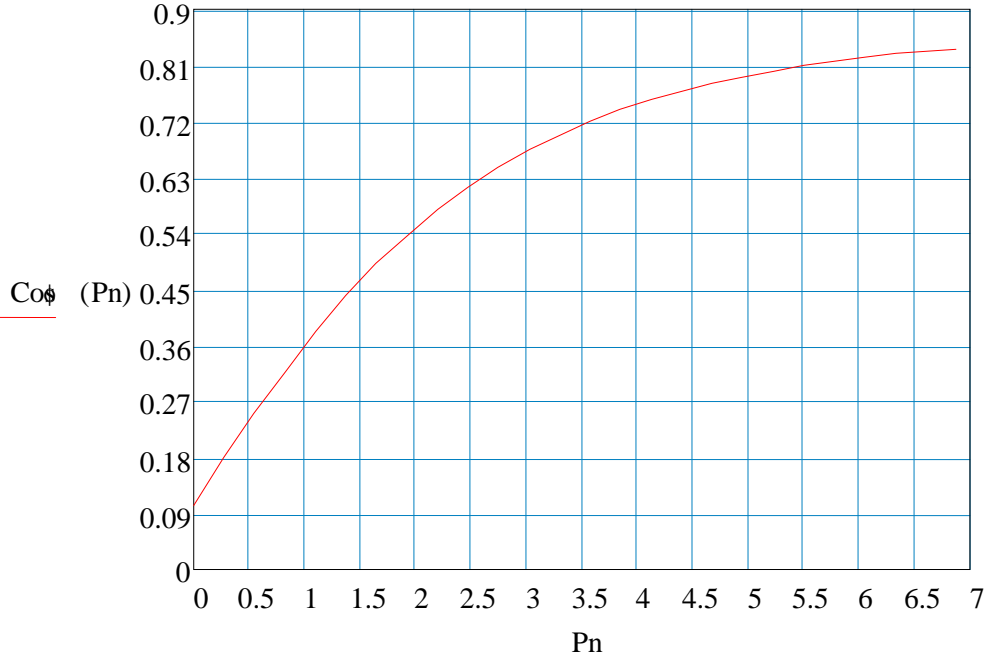
Afin de valider nos résultats, on interprétera les différentes figures des caractéristiques des paramètres de la machine obtenus dans le programme de calcul ; et on fera la comparaison avec la machine standard.

### Interprétation des caractéristiques :



On remarque que la courbe du rendement en fonction de la puissance nominale commence par l'origine, elle évolue linéairement jusqu'à 300 watts, donc on peut dire que le rendement est proportionnel à la puissance nominale dans cette zone. De 300 watt jusqu'à 5,5 kilowatt elle forme un coude donc le rendement n'est pas proportionnel à la puissance nominale dans cette zone, dès qu'elle dépasse sa valeur crête de 5,5 kilowatts, il n'y a pas une grande variation du rendement (légère diminution).

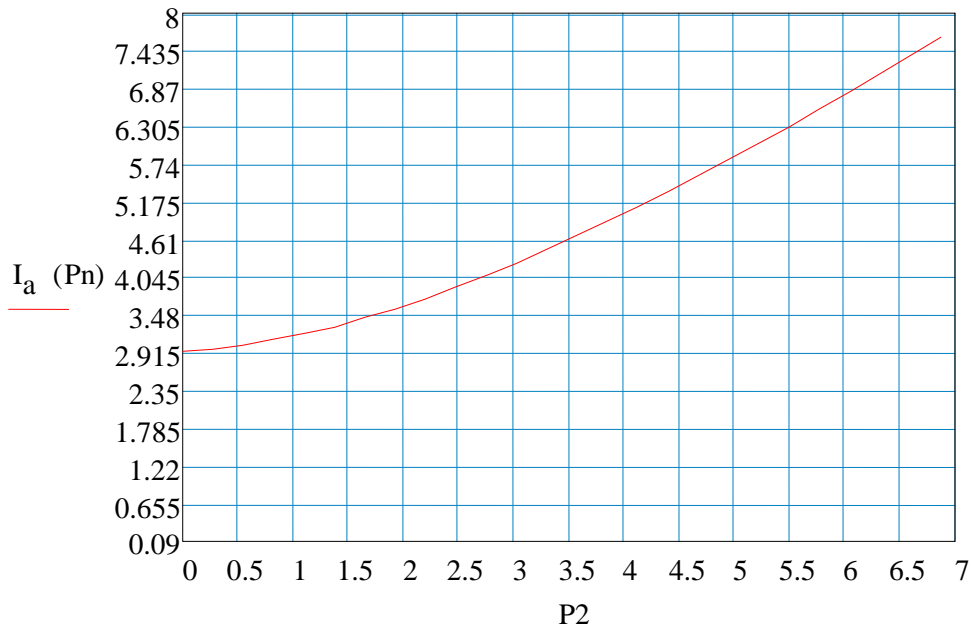
Fig 2:facteur de puissance en fonction de la puissance nominale



La courbe du facteur de puissance en fonction de la puissance nominale ne commence pas par l'origine et elle représente un exponentiel croissant.

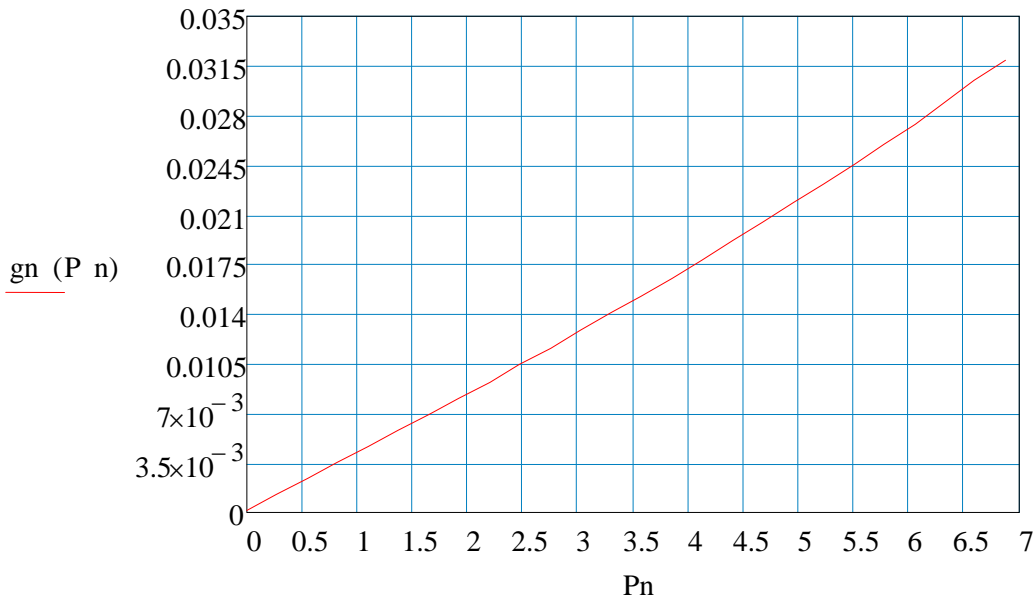
Le facteur de puissance  $\cos \phi$  dépend en grande partie de la charge et atteint la valeur de crête pendant la surcharge. Ce facteur est relativement défavorable dans la plage de faible charge à cause d'une magnétisation pratiquement constante.

Fig 3: Courant absorbé en fonction de la puissance nominale

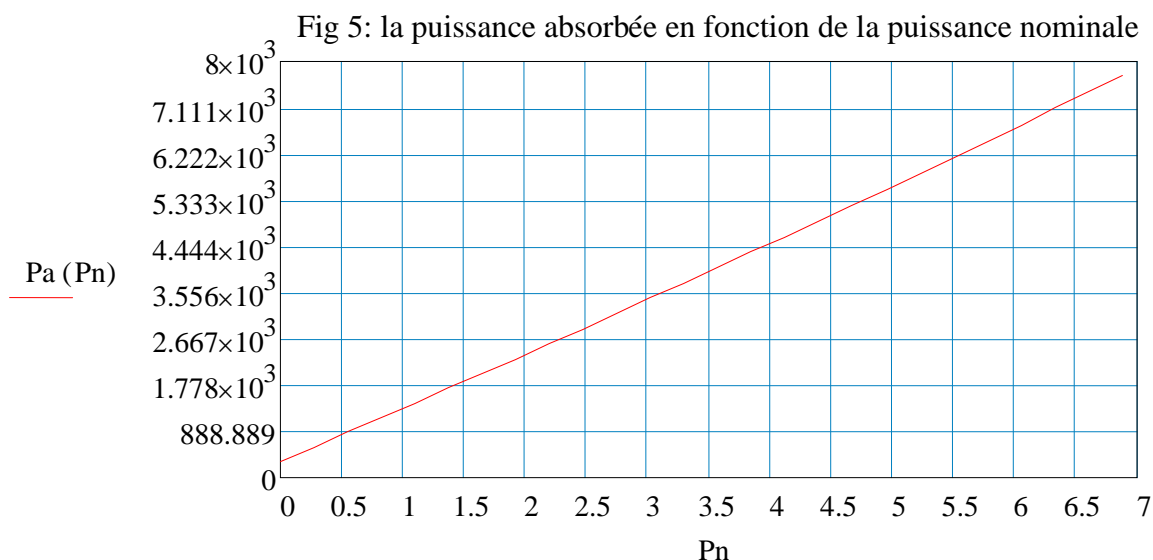


On remarque que la courbe de l'intensité de courant commence par le courant à vide  $I_0$  elle augmente lentement jusqu'à la valeur de 50% de la puissance nominale. Au delà de cette valeur, l'intensité de courant commence à augmenter proportionnellement par rapport à la puissance nominale.

fig4: le glissement en fonction de la puissance nominale



On remarque que la courbe du glissement est presque une droite, chaque fois qu'on augmente la puissance nominale le glissement augmente.



La puissance P11 augmente plus ou moins proportionnellement à la charge à partir de la puissance à vide. Elle augmente un peu plus rapidement dans la plage de surcharge étant donné que les pertes sont également plus importantes.

### Comparaison

Pour l'acier, le cuivre l'aluminium les tôles magnétiques et l'isolation on a gardé les mêmes matières que celles des moteurs standards.

Pour le moteur calculé, nous avons changé la longueur virtuelle de l'induit du moteur standard de 110mm à 150mm en agissant sur l'induction et la charge linéaire.

Les principaux résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

	Moteur standard	Moteur calcul
$\eta$ (%)	84	88,6
Cos (phi)	0,85	0,81
$I_n$ (A)	6,75	6,33
N (trs /min)	1450	1463
$C_n$ (Nm)	36	35,89
$I_d / I_n$	7,0	7,87
$C_d / C_n$	2,2	1,965
$C_{max} / C_n$	2,8	3,85
$S_{eff}$ (mm <sup>2</sup> )	0,3959	0,6082
diso (mm)	0,753	0,952
Pa (kw)	7,7	6,206
V (mm <sup>3</sup> )	3456000	4712000

**Observation :**

Après avoir calculé le moteur de notre étude on remarque que :

- 1-Le volume du moteur a augmenté par rapport au volume initial à cause de l'augmentation de la longueur virtuelle de l'induit.
- 2-La section des conducteurs a augmenté ce qui permet la diminution de la densité de courant.
- 3-La vitesse de rotation du rotor a augmentée ce qui permet la diminution du glissement. Ce dernier est proportionnel au couple utile donc le couple utile a diminué.
- 4-La puissance absorbée a diminué.
- 5-Le nombre de conducteurs effectifs dans une encoche et le courant nominal a diminué ce qui a conduit à la diminution de la charge linéaire et le nombre de spires d'une voie parallèle a diminué donc une économie de cuivre ainsi une minimisation des pertes joules statorique.
- 6-Toutes ces modifications ont contribuées à l'augmentation du rendement jusqu'à une valeur de 88,6 % ce qui permet de classer notre type de moteur dans la classe de rendement niveau HAUT (**IE2**) alors qu'il a été dans le rendement niveau STANDARD (**IE1**).

# ***Conclusion générale***

## Conclusion générale

Concevoir une machine électrique ça nécessite une étude profonde et des recherches intenses, ainsi que des moyens. Ce qui induit à une longue durée de travail.

Dans ce mémoire, on a voulu mettre en évidence l'intérêt d'amélioration du rendement (optimisation) des moteurs asynchrones et plus particulièrement les moteurs à cage d'écureuil de façon à permettre la maîtrise d'énergie.

Pour atteindre ce but on a procédé à un calcul de la machine asynchrone avec un logiciel de programmation.

Lorsqu'on veut construire une machine électrique, on ne doit pas seulement tenir compte de ses propriétés électromagnétiques, mais faire en sorte qu'elle soit la plus performante possible. Le dimensionnement doit satisfaire avant tout les lois de la physique en particulier magnétiques, électriques et mécaniques, d'autres parts il doit en même temps répondre aux exigences du cahier de charge tel que la capacité de surcharge, le facteur de puissance et les conditions de démarrage.

La conception des machines électriques s'avère très vaste, nous souhaitons que d'autres études prennent en considération d'autres paramètres.

## Bibliographie

- [1] Bouchard, R.P, Olivier, G, «Conception de moteurs asynchrones triphasés », édition de l'école polytechnique de Montréal, 1997.
- [2] G. Segulier, « Electrotechnique Industrielle », Lavoisier, 2ème Edition, Paris, France, 1985.
- [3] Catalogue de l'entreprise nationale des industries électrotechniques. Azazga.
- [4]Ameur T, Ankour A, aribas M « conception d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil alimenté par un convertisseur de fréquence », thèse d'ingénieur, université de Tizi-Ouzou, 2007.
- [5]Katsman M.M, « calcul et construction des machines électriques »,Edition Ecole Supérieur de Moscou,1984.
- [6]Chekroun S, « Contribution à l'étude des moteurs asynchrones à haut rendement », thèse de doctorat, Université de Batna, 2011.
- [7]Wildi.T avec la collaboration de Sybille.G, « Electrotechnique »,3eme édition de l'université de Boeck, Canada ,1997.
- [8] Rebbah Redjem, « Calcul et Conception Assistée par Ordinateur des Machines Electriques Application aux moteurs asynchrones », thèse de magister, université de Constantine.
- [9]A.Fouille. « Machines électriques à courant alternatif » tome 2, Edition école national d'ingenieur, France, 1973.



***Annexe***

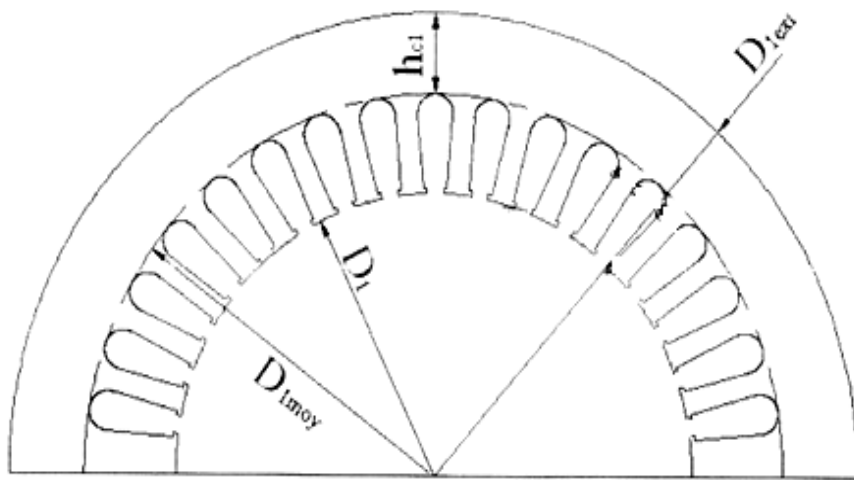


Fig III-1-a : feuille statorique

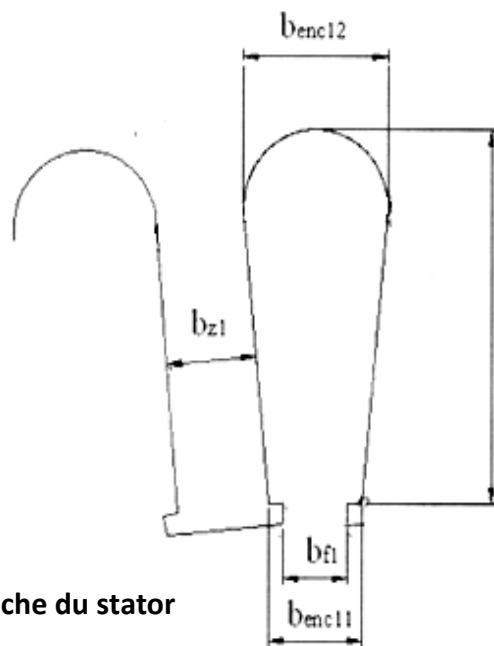


Fig III-1-b La dent et l'encoche du stator

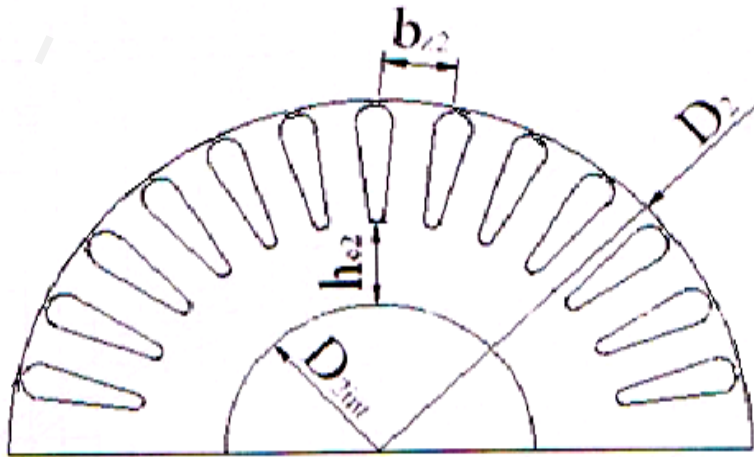


Fig III-2-a la feuille rotorique

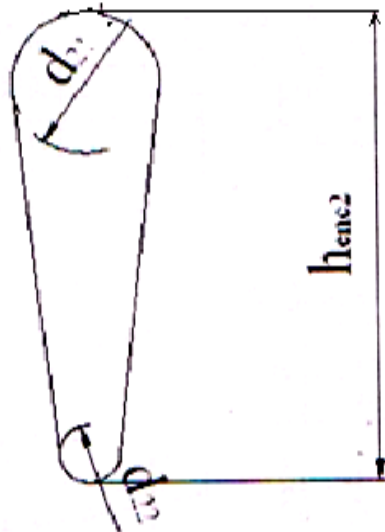


Fig III-2-b Encoche rotorique ovale

Fig III-3-1

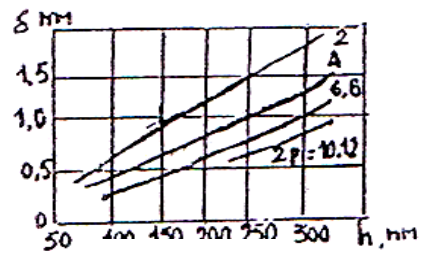
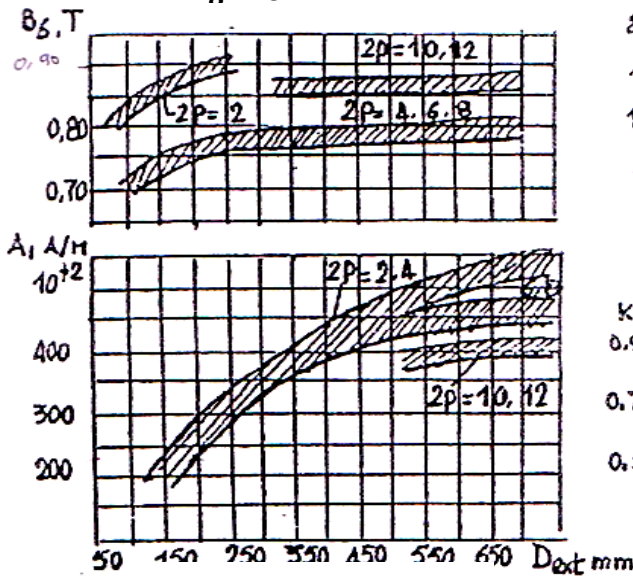


Fig III-3-5

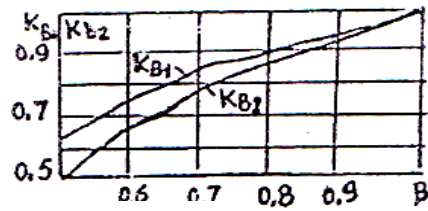


Fig III-3-6

Fig III-3-2 Fig III-3-3

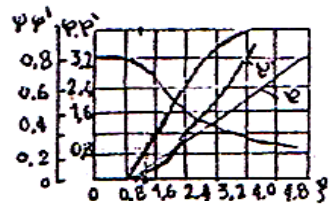
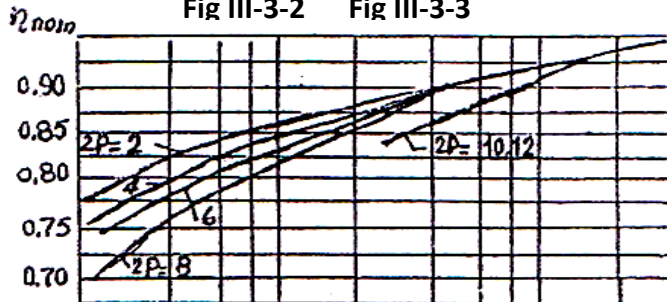


Fig III-3-7

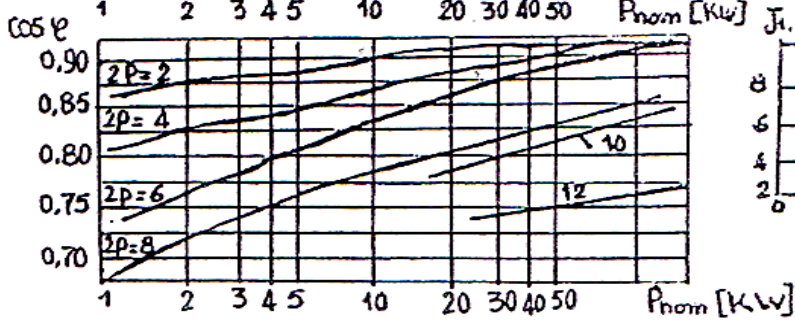


Fig III-3-4

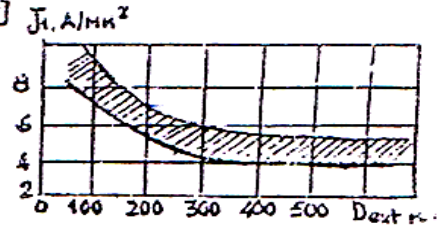


Fig III-3-8

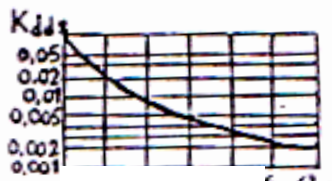


Fig. III-4-1

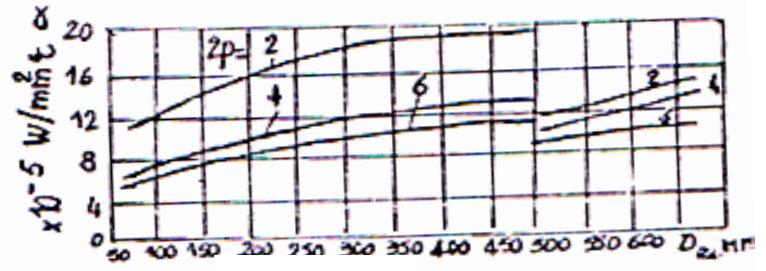


Fig. III-4-5

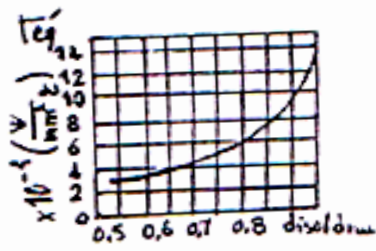


Fig. III-4-2

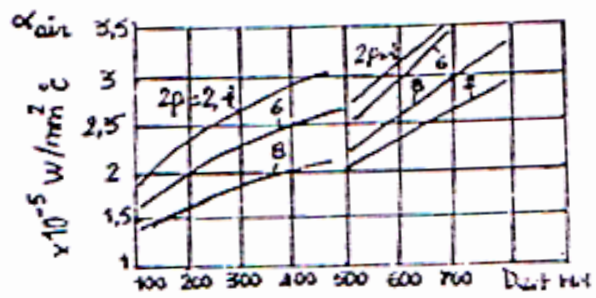


Fig. III-4-6

Fig. III-4-3

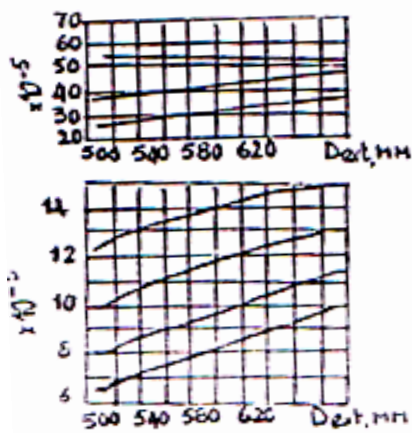


Fig. III-4-4

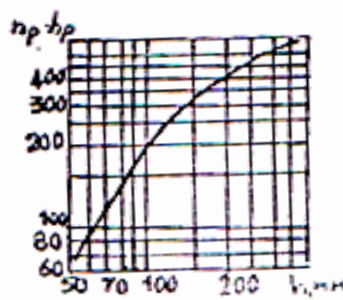


Fig. III-4-7

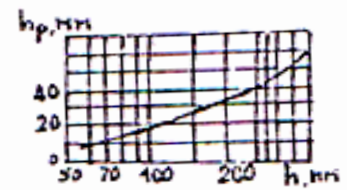


Fig. III-4-8

Tableau III-1 : section normalisée

<i>Section nominale (Snom) en mm</i>	<i>Diamètre nu (dnu) en mm</i>	<i>Diamètre avec isolation (diso) en mm</i>
0.00785	0.1	0.125
0.00882	0.106	0.131
0.00985	0.112	0.139
0.01094	0.118	0.145
0.01227	0.125	0.153
0.01368	0.132	0.161
0.01539	0.14	0.170
0.01767	0.15	0.181
0.02011	0.16	0.192
0.02270	0.17	0.203
0.02545	0.18	0.215
0.02835	0.19	0.225
0.03142	0.2	0.236
0.03530	0.217	0.250
0.03941	0.224	0.262
0.04374	0.236	0.276
0.04909	0.25	0.290
0.05515	0.265	0.307
0.06158	0.28	0.322
0.07069	0.30	0.344
0.07793	0.315	0.360
0.08814	0.335	0.381
0.09898	0.355	0.403
0.1104	0.375	0.424
0.1257	0.4	0.450
0.1419	0.425	0.478
0.1590	0.45	0.503
0.1772	0.475	0.531
0.1964	0.5	0.556
0.2124	0.52	0.576
0.2206	0.53	0.587
0.2463	0.56	0.619
0.2642	0.58	0.640
0.2827	0.6	0.661
0.3117	0.63	0.692
0.3318	0.65	0.713
0.3526	0.67	0.735
0.3959	0.71	0.776
0.4418	0.75	0.817
0.4778	0.78	0.848
0.5027	0.8	0.869
0.5281	0.82	0.890
0.5674	0.85	0.921
0.6082	0.88	0.952
0.6362	0.9	0.973
0.7088	0.95	1.0.24
0.7854	1.00	1.076
0.8825	1.06	1.137
0.9852	1.12	1.199
1.095	1.18	1.260
1.227	1.25	1.332
1.368	1.32	1.404

**Tableau III-2** l'intensité du champ magnétique dans la dent statorique et rotorique qui correspond à Bz1 et Bz2

B(H)	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	585	585
1,4	586	595	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	706	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2160	2250	2320	2480	2520	2640	2760	2890	3020
2,0	3150	3320	3500	3500	3860	4040	4260	4480	4700	4920
2,1	5110	5440	5740	5740	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	8920	9430	9940	9940	10980	11500	12000	12600	13200	13800
2,3	14400	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21400

**Tableau III-3 Intensité du champ magnétique dans la culasse qui correspond Bc1 et Bc2**

B(H)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.4	52	53	54	55	56	57	58	59	60	62
0.5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	79
0.6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0.7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0.8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0.9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1.0	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1.1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1.2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1.3	320	327	334	341	349	359	365	373	382	391
1.4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1.5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726
1.6	750	788	826	864	902	946	982	1020	1070	1110
1.7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1.8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1.9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2.0	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8409	9000	9700



Tableau III-4 :Q en fonction de 2P

hauteur d'axe [mm]	2P=2	2P=4	2P=6
63	4	2	2
71	4	2	2
80-100	4	3	2
112-132	4	3	3
160	6	4	3
180-225	6	4	4
250	8	5	4
280-355	8	5	4

Tableau III-5 : Krr1 en fonction de Q1

Q1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8
Krr1	-	0,0285	-	0,0141	0,0065	0,0052	-	-

Tableau III-6 : Kdd1 en fonction Z2/P

Q1	10	15	20	25	30	35	40
2	0,99	0,94	-	-	-	-	-
3	0,98	0,93	0,88	0,85	-	-	-
4	-	0,90	0,84	0,80	0,77	-	-
5	-	-	-	0,75	0,72	0,70	-
6	-	-	-	0,70	0,60	0,62	-
8	-	-	-	-	-	0,53	0,51

Tableau III-7 : K en fonction 2P

	2P=2	2P=4	2P=6
IP44	0,22	0,20	0,19
IP23	0,84	0,80	0,78