

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté du génie électrique et informatique
Département d'électrotechnique



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de master
Académique Entraînement Electrique

Thème

Conception numérique et analytique d'un
moteur asynchrone triphasé à cage
d'écureuil de 5,5kw

Proposé par:

Mme : OUDNI Zehor

En collaboration avec:

Mr Dj.BENTAHA

(Electro-Industries)

Dirigé par: Mme OUDNI Zehor

Réalisé par:

M^{elle} TEKLI Massicilia

Année Universitaire: 2013



REMERCIEMENT

D'abord, je tiens à remercier le bon DIEU de m'avoir accordée la force et le courage de munir à terme ce mémoire.

Ensuite je remercie ma promotrice Mme OUDNI Zhour enseignante à l'université De Tizi-Ouzou, pour les efforts qu'il a déployés.

Je voudrais adresser mes vifs remerciements aux personnels d'ELECTRO-INDUSTRIES particulière Mr. Dj. BENTAHA pour l'aide qu'il m'a fournie.



Mes remerciements vont également au président et aux membres du jury qui me fera l'honneur d'évaluer mon modeste travail, ainsi qu'à tous les enseignants qui ont contribué a ma formation.

Je remercie aussi tous ceux qui ont contribué à faciliter la tâche de mon travail, en prodiguant généralement leur aide accompagnée de sympathie et d'encouragements trouvent ici l'expression de mes sincères gratitudes.

Enfin, Je tiens à exprimer mes remerciements les plus chaleureux à ma famille pour leur soutien et leur présence et à toute personne ayant participé de près comme de loin à l'aboutissement de ce mémoire et je remercie toute la promotion 2013.



Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents
pour tous leurs sacrifices, Leur soutien et leur aide et
sans eux je ne serai pas ce que je suis aujourd'hui.*

A mon frère Said et sa femme Malika.

A ma chère sœur Souhila et son mari Said.

A mes très chers sœurs : Kahina, Zazi et Tifina.

A mon adorable petite sœur Thiziri

A mon frère Iyas.

A ma chère amie Dhaouia

A tout mes tantes et oncles et leurs enfants.

A tout mes amis(es) de près comme de loin

A toute la promotion 2013.

Massicilia



Sommaire

Introduction générale	1
Présentation de l'Entreprise	2

Chapitre I: La machine asynchrone triphasé : Etat de l'art

I.1. Introduction.....	4
I.2.construction du moteur asynchrone triphasé	4
I.2.1. Le stator.....	5
I.2.2. Le rotor.....	8
I.2.3. Les organes mécaniques	9
I.2.4. Bobinage	10
I.3. principe de fonctionnement.	11
I.3.1.définition du glissement	11
I.3.2. Vitesse de synchronisme	12
I.3.3. Couple	12
I.3.4. Démarrage	13
I.3.4.a. Démarrage direct	13
I.3.4.b. Démarrage étoile – triangle.....	13
I.3.5. Freinage.....	15
I.3.6.Facteur de puissance	16
I.3.7.Les régimes de fonctionnement de la machine asynchrone	17
I.4. Bilan des puissances et des pertes	18
I.5. Les principaux défauts dans la machine asynchrone a cage	20
I.5.1. défauts de roulement	20
I.5.2. défauts statoriques	20
I.5.3. défauts rotoriques	22
I.6. Conclusion.....	23

Chapitre II: matériaux de conception des machines asynchrone

II.1. Introduction	24
II-2. Les matériaux électrotechniques.	24
II.2.1. Classification.....	24
II.2.2. Les matériaux conducteurs.....	24
II.2.2.1. Bons conducteurs.....	24
II.2.2.2. Formes des conducteurs.....	25
II.2.3. Propriétés	26
II.2.3.1. Propriétés électrique	26
II.2.3.2. Propriétés mécanique	26
II.2.3.2. Propriétés physique et chimique	27
II.2.4. Matériaux magnétiques.....	28
II.2.4.1. Définition	28
II.2.4.2. Classification des matériaux d'un point de vue magnétique.....	29
II.2.4.3. Matériaux ferromagnétiques laminés et ses alliages	31
II.2.5. L'isolation des machines électriques	32
II-2-5-1 Isolation des tôles	33
II.2.5.2. Isolation des enroulements	33
II.3. Conclusion.....	34

Chapitre III : Dimensionnement du moteur asynchrone par élaboration d'un code de calcul sous environnement Matlab.

III.1. Introduction	35
III.2. Dimensionnement de la machine asynchrone	35
III.2.1. Calcul de la partie statorique	36
III.2.2. Dimensionnement de la feuille statorique	39
III.2.3. Calcul de la partie rotorique	42
III.2.4. Dimensionnement de la feuille statorique	44
III.3. calcul de circuit magnétique	47
III.4. Calcul des paramètres électriques des enroulements	51
III.4.1. paramètre statorique	51
III.4.2. paramètre rotorique	53
III-4-3-paramètres au démarrage	57
III.5. Calcul des pertes et du rendement	58
III-5-1- pertes principale dans le fer	59
III-4-2- Pertes électrique dans le cuivre et dans l'aluminium	60
III-5-3- Pertes mécanique	60
III-4-4- Pertes supplémentaires	61
III-5-5- Pertes totales	61
III-5-6- Le rendement de la machine	61
III-5-7- Calcul de la résistance de magnétisation	61
III.6. Calcul des performances du moteur	62
III-6-1- le schéma équivalent en L du moteur	62
III-6-2- caractéristique de fonctionnement du moteur	63
III-6-3- Caractéristiques de démarrage et capacité de surcharge	66
III-7- Résultats obtenu avec Matlab	69
III.7. Conclusion	72

Chapitre IV : Exploitation du logiciel speed pour le calcul du moteur

IV.1 Introduction	73
IV.2 Définition de PC-IMD.....	73
IV.3. Utilisation de PC-imd.....	74
IV.4. Les différentes étapes de PC - imd	75
IV.4.1. Outline Editor.....	75
4.1.1. Dimensionnement du stator	75
IV. 4.1.2. Dimensionnement du rotor.....	75
IV.4.2. Template Editor, Ted	76
IV.4.3. Winding Editor.....	77
IV.4.4. Sélection de matériaux à partir de la banque de donnée.....	80
IV.4.5: Design sheet.....	82

»Sommaire

Chapitre V : Comparaison entre résultats des deux logiciel Matlab et SEED-imd	
<i>Conclusion générale</i>	91
<i>Annexe</i>	

Introduction générale

» Introduction Générale

Les machines électriques tournantes sont des dispositifs qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique (moteur électrique) ou qui fournissent de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie (génératrice). Elles occupent une place importante dans la vie active et constituent l'élément essentiel de toute installation énergétique ou industrielle.

Parmi ces moteurs, le moteur asynchrone triphasé à cage d'écuriel est le plus répandu dans l'industrie, en raison de robustesse, sa fiabilité, son faible coût, son excellent rendement, sa simplicité d'utilisation et aussi il nécessite peu d'entretien.

La conception des moteurs asynchrones triphasés a été conçue dans le but d'ajouter aux connaissances théoriques déjà acquises sur le fonctionnement des moteurs asynchrones un complément essentiel à la formation en électrotechnique.

Dans le domaine de construction des moteurs, il existe plusieurs méthodes de calcul et de dimensionnement, celles-ci diffèrent d'un constructeur à un autre. Ainsi les performances d'un moteur dépendent essentiellement de son dimensionnement et de ses propriétés électrique et thermique des matériaux utilisés.

Dans ce contexte, notre projet de fin d'étude effectué au sein de l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIE consiste en une étude et dimensionnement d'une machine asynchrone triphasé à cage d'écuriel 5,5 kW avec logiciel SPEED (PC-IMD).

Le manuscrit est subdivisé en cinq chapitres :

- ✓ Le premier chapitre traite les généralités sur la machine asynchrone de point vue constructive et mode de fonctionnement.
- ✓ Le deuxième chapitre, nous donnerons un aperçu sur les différents matériaux utilisés dans un moteur asynchrone.
- ✓ Le troisième chapitre s'intéressera au dimensionnement et relations de base d'un moteur asynchrone triphasé.
- ✓ Le quatrième chapitre sera consacré à l'application du logiciel SPEED PC-imd pour dimensionner le moteur en question.
- ✓ Le cinquième chapitre est réservé pour la comparaison entre les résultats théorique obtenue avec un logiciel de programmation (MATLAB) et ceux obtenu avec le logiciel SPEED.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

» *Présentation de l'entreprise*

» Présentation de l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIES d'AZAZGA

1. Historique

A l'origine, l'entreprise est issue de la réorganisation du secteur opérée en Algérie entre 1980 et 2000 qui a conduit en 1999 à la restructuration de l'ancienne ENEL (entreprise nationale des industries électrotechniques) en un certain nombre d'entreprises publiques économiques, sociétés par action (EPE/SPA), parmi lesquelles figure « ELECTRO-INDUSTRIES » au capital social de 4 753 000 000 DA.

L'usine a été réalisée dans le cadre d'un contrat produit « clé en main » avec des partenaires Allemands, en l'occurrence, SIEMENS pour le produit et FRITZ WERNER pour l'engineering et la construction. L'infrastructure est réalisée par les entreprises Algériennes ECOTEC, COSIDER et BATIMAL.

2. Situation

L'entreprise (ELECTRO-INDUSTRIE) d'une superficie de 38 ha, est située sur la route nationale N 12 distante de 30 km du chef lieu de la wilaya TIZI-OUZOU de 8 km de la commune d'AZAZGA.

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

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

Les produits fabriqués par ELECTRO-INDUSTRIE sont conformes aux recommandations CEI et aux normes Allemandes DIN/VDE.

La production actuelle d'ELECTRO-INDUSTRIE est écoulée sur le marché Algérien et génère un chiffre d'affaire de 1.8 Milliards de Dinars.

La capacité de production de transformateurs de l'entreprise couvre les besoins du marché à 70 environ.

Les ventes de moteurs représentent 30 environ de la capacité de production.

Il est signalé qu'ELECTRO-INDUSTRIE est le seul fabricant de ces produits en Algérie.

3. présentations de l'unité moteur

L'unité Moteur asynchrone s'occupe de la fabrication des moteurs asynchrones à différentes puissances et à différentes hauteurs d'axes.

Parmi les moteurs électriques fabriqués par ELECTRO-INDUSTRIES d'AZAZGA, on a le moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil. Pour assurer leur réalisation, l'unité moteur dispose de six ateliers de fabrication mécaniques disposant de postes des contrôles (mécanique et électrique) pour valider la conformité de chaque pièce fabriquée, rentrant dans la réalisation de chaque type de moteur.

4. Les différents ateliers de fabrication des moteurs asynchrones de l'UMP

1. Atelier de découpage ;
2. Atelier de moulage sous pression ;
3. Atelier d'usinage ;
4. Atelier de bobinage ;
5. Atelier de montage.
6. Contrôle qualité.

Chapitre I

» *Synthèse bibliographique*

I-1 Introduction :

La conception des machines asynchrones recouvre un domaine d'activité très vaste qui va de la machine de quelques watts de puissance destinée à des applications informatiques jusqu'au moteur de quelques mégawatts implanté dans des procédés industriels lourds [1].

Ce type de machine représente une grande partie du marché des machines électriques. Des efforts considérables ont été et sont toujours menés pour perfectionner la théorie et les méthodes d'analyses et de conceptions de celle-ci, afin d'améliorer ses performances et d'optimiser son prix.

Le premier chapitre a pour objectif de revenir rapidement sur la constitution et la construction des machines asynchrones. En passant brièvement sur ces caractéristiques et les multiples défaillances qui peuvent apparaître dans ces machines.

I.2. Construction de moteur asynchrone triphasé :

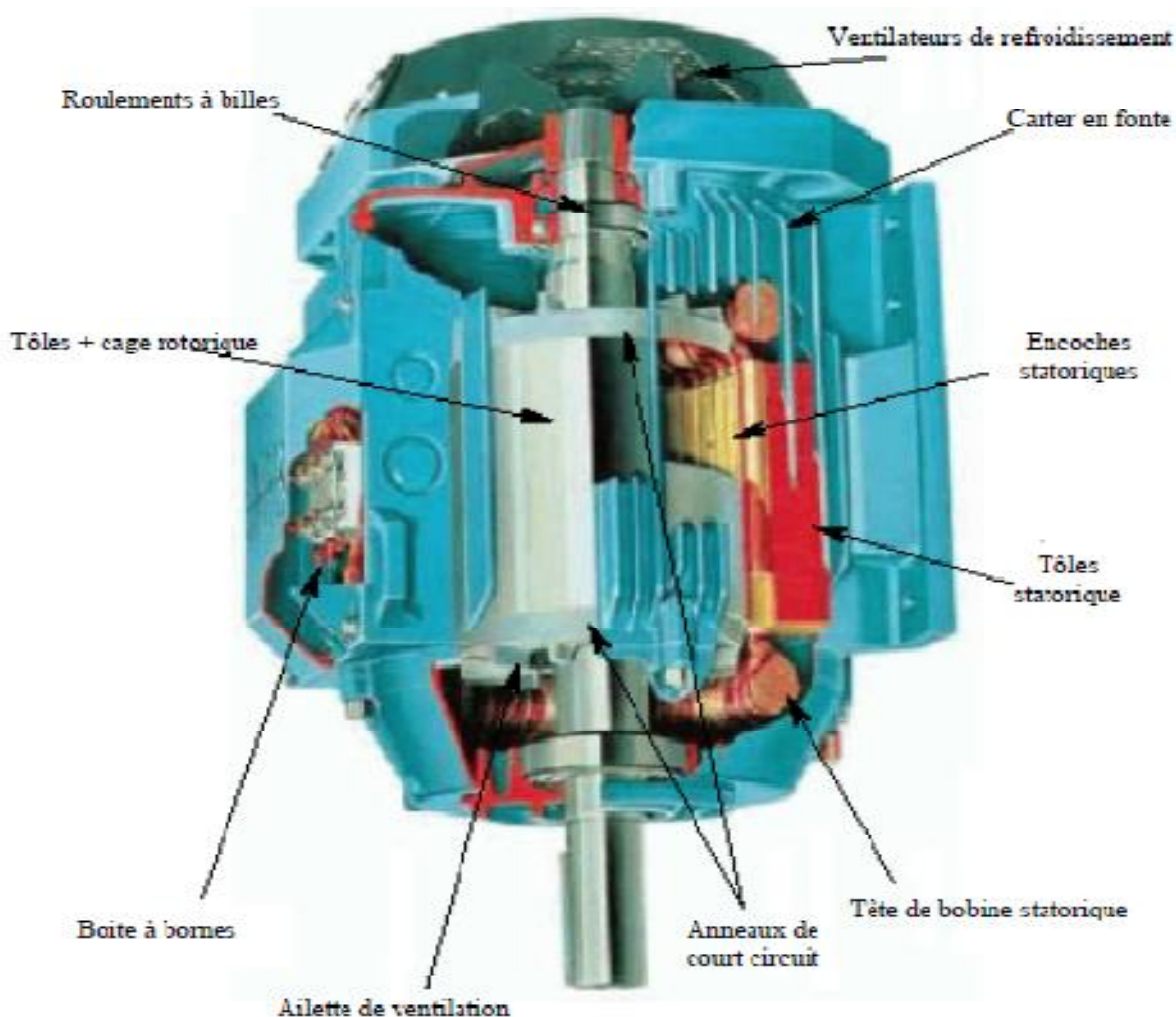


Figure (I.1). Eléments de construction d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

Deux composantes principales constituent le moteur asynchrone, souvent appelé moteur d'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 et libre de tourner. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux - mêmes en permanence, on reconnaît deux types de rotor: le rotor bobiné et le rotor à cage d'écureuil.

Dans le cas du rotor bobiné, aussi appelé rotor à bagues, l'enroulement triphasé, relié en étoile ou en triangle, est connecté à trois bagues qui le rendent accessible de l'extérieur par l'intermédiaire de balais. On peut ainsi le court-circuiter comme cela se produit en marche normale, insérer des résistances dans le circuit lors du démarrage et dans certains cas spéciaux de fonctionnement ou y raccorder un convertisseur de courant à thyristors afin de régler le courant de démarrage et la vitesse en marche.

Depuis quelques années, le moteur à bagues a été délaissé au profit du moteur à cage piloté par des convertisseurs à fréquence variable.

Les encoches du rotor à cage d'écureuil comportent des barres en cuivre ou en aluminium réunies entre elles de part et d'autre du rotor par des anneaux. Dans le cas de moteurs de faible puissance et même de puissance moyenne, les cages sont en aluminium coulé sous vide partiel et pression. Ce procédé permet d'éviter la présence néfaste de bulles d'air dans les barres et d'obtenir en une seule opération les barres, les anneaux de chaque extrémité et parfois même les ailettes de ventilation. Toutefois, dans les petits moteurs de fabrication récente, on utilise plutôt des ailettes en plastique, étant donné que cette matière est beaucoup moins coûteuse que l'aluminium. [4,2-3]

I-2-1 le stator :

Le stator consiste en un empilement de tôles d'acier 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 (*fig. I.2*).

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.

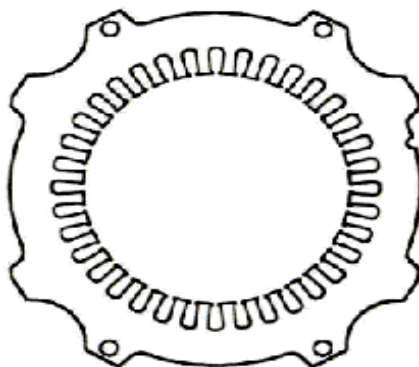


Figure (I.2) : Stator d'une machine asynchrone.

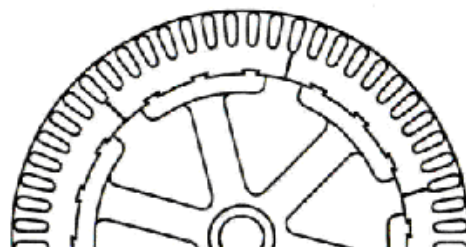


Figure (I.3) : Rotor d'une machine asynchrone.

Même lorsqu'on y procède avec des outils en très bon état, les opérations de découpage et d'usinage des tôles produisent des bavures sur le contour.

Ces bavures ont pour effet de court-circuiter ou de relier entre elles les tôles et d'augmenter les courants de Foucault. Dans les machines soignées, on atténue ces effets en passant les tôles découpées entre des rouleaux pour redresser les bavures.

Les opérations de découpage et d'encochement ont aussi pour effet de créer des efforts internes dans les tôles et de détériorer les qualités magnétiques de l'acier; les pertes par hystérésis s'en trouvent augmentées. On peut rétablir les propriétés de l'acier par un recuit dans des chambres hermétiques à atmosphère contrôlée, précaution nécessaire si on veut éviter l'oxydation des tôles.

Les diverses formes d'encoches sont de deux types génériques: ouvert et semi-ouvert (*fig.I.4*). Les encoches de type ouvert sont habituellement de même largeur sur toute leur profondeur, par conséquent, les dents sont de forme trapézoïdale avec un étranglement près de l'entrefer pour insérer une clavette.

Les encoches de type semi ouvert sont généralement de forme trapézoïdale, ce qui permet d'usiner des dents à parois parallèles.

L'ouverture laissée par ce deuxième type d'encoche est réduite à une largeur minimale mais permet toutefois qu'on y insère des conducteurs de faible diamètre. Pour des longueurs de stator (et de rotor) inférieures à 200 mm, on ne subdivise pas le paquet de tôles.

Au-delà de 200 ou 250 mm, le paquet de tôles est en général divisé en paquets élémentaires séparés par des espaces d'air ou canaux de ventilation dont la largeur varie entre 8 et 12 mm.

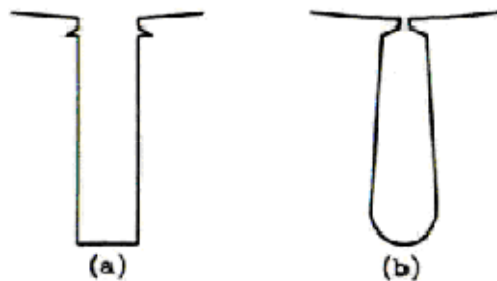


Fig.I.4. Encoche statorique et rotorique d'un moteur asynchrone.

Toutefois, ces canaux de ventilation ne peuvent être vraiment efficaces si, au rotor et au stator, ils ne se trouvent pas vis-à-vis les uns des autres. De plus, leur efficacité est faible s'il n'y a pas de canaux longitudinaux dans le rotor aspirant l'air et par la suite l'expulsant par les canaux radiaux.

Pour cette raison, si les rotors sont de faible diamètre et que des canaux longitudinaux ne sont physiquement pas réalisables, on ne retrouvera pas, en principe, de canaux radiaux au rotor et au stator même si la longueur du circuit magnétique est de plusieurs centaines de millimètres. Dans ce cas, la présence des canaux radiaux ne ferait qu'augmenter la longueur des conducteurs et les pertes dans ces derniers.

Pour maintenir l'espacement prévu entre les paquets de tôles et éviter l'étalement des tôles, particulièrement au niveau des dents, ou cela risquerait d'obstruer les canaux de ventilation et de produire des vibrations, on utilise des entretoises (*fig.1.5*).

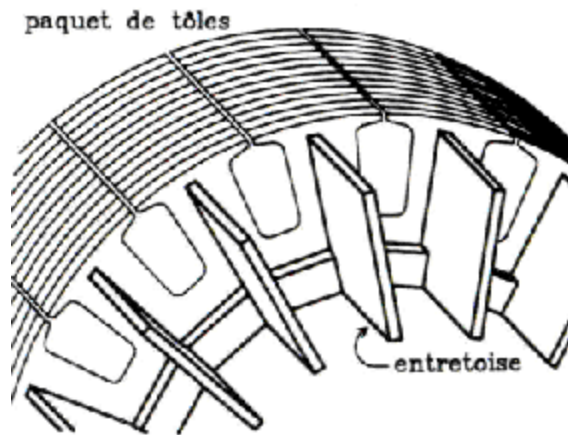


Fig.1.5. Les entretoises dans un rotor a cage.

Pour éviter que les tôles vibrent et produisent du bruit, on les serre ensemble et on les retient à l'aide de boulons ou de cordons de soudure.

Les valeurs mentionnées précédemment pour l'épaisseur des paquets de tôles sont valables pour des vitesses périphériques moyennes. Nous y reviendrons lorsqu'il sera question du choix du diamètre du stator et du rotor. [4,2-3]

I-2-2 le Rotor :

Le rotor est fait, comme le stator, de tôles empilées et habituellement du même matériau. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées en une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans de plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections et montée sur un moyeu (*fig. II.3*).

Pour les rotors du type bobiné, les enroulements et leurs différents aspects sont semblables à ceux du stator. Ils présentent toutefois la particularité d'être connectés à des bagues sur lesquelles frottent des balais qui rendent le circuit du rotor accessible de l'extérieur.

Dans le cas des rotors à cage d'écureuil, les encoches sont habituellement du type semi-ouvert, mais on utilise parfois des encoches fermées. Les enroulements sont constitués de barres court-circuitées par un anneau terminal placé à chaque extrémité du rotor.

Les barres des gros moteurs sont généralement en cuivre ou, à l'occasion, en laiton. Par contre, les barres des petits moteurs sont en aluminium, on utilise de plus en plus le coulage d'aluminium pour des moteurs de plusieurs dizaines et même de quelques centaines de kilowatts.

L'aluminium coulé permet de fabriquer les anneaux terminaux en même temps que les barres qui épousent la forme de l'encoche, qui peut être tout à fait quelconque. Puisque la tension induite dans les barres du rotor est faible, aucune isolation n'est requise entre les barres et les dents.

Pour former le rotor, on empile généralement les laminations de façon que les conducteurs soient obliques par rapport à l'axe du moteur (*fig. I.6*).

Cette disposition a pour effet de réduire considérablement le bruit et les sous harmoniques durant l'accélération et de donner un démarrage et une accélération plus uniforme, en plus d'éviter l'accrochage et les oscillations à faible charge. [4,2-3]



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

1.2.3. Les organes mécaniques

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur.

L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre.

Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance.

Les paliers, qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage. L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone à cage d'écurieil.

Afin d'assurer la variation de vitesse des moteurs électriques mais aussi la conversion de l'énergie, de nombreuses machines se voient associer un convertisseur. Ainsi, de nos jours, on trouve dans un grand nombre de procédés industriels, des associations entre des convertisseurs statiques et des machines électriques (pompage, levage,...). Cela permet de fournir aux moteurs des tensions et des courants de fréquence variable servant à commander la machine en couple ou en vitesse.

1.2.4. 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.[2][5][6]

1.3.Principe de fonctionnement:

Les courants qui circulent dans les bobinages du stator d'un moteur asynchrone créent un champ magnétique tournant. La vitesse de rotation de ce champ est appelée vitesse synchrone, elle est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique du moteur, comme pour les moteurs synchrones.

Le rotor tourne à une vitesse généralement différente de celle du champ tournant. Du fait de cette différence de vitesse, le flux magnétique intercepté par le rotor varie, produisant une tension induite dans les conducteurs des circuits rotoriques (cage ou enroulements).

Ces circuits étant en court-circuit, il y circule des courants qui tendent à s'opposer à la variation de flux (loi de Lenz), donc à réduire la différence de vitesse. L'interaction de ces courants et du champ magnétique crée un couple électromécanique T_{em} entraînant la rotation du moteur.

Cette différence de vitesse de rotation du rotor par rapport à celle du champ tournant, nous ramène à définir un paramètre qui caractérise les machines asynchrones, qu'on appelle le glissement.

1.3.1.définition du glissement

Le glissement mesure l'écart relatif entre la vitesse de rotation de la machine et la vitesse de synchronisme :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad n = n_s(1 - g) \quad (1.1)$$

Avec : n_s : vitesse synchronisme (tr/min)

n : vitesse de rotation du rotor (tr/min)

I.3.2. Vitesse de synchronisme:

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. Ce champ tourne à la même fréquence que les courants statoriques, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique.

On désigne par n_s la vitesse de synchronisme, c'est-à-dire la fréquence de rotation du champ statorique dans la machine. [8]

On désigne par n la vitesse de rotation de la machine.

La fréquence de synchronisme est toujours un sous multiple entier de la fréquence du secteur

- en 50 Hz c'est un sous multiple de 3000 tr/min soit : 3000 ; 1500 ; 1000 ; 750 ; etc.
- en 60 Hz c'est un sous multiple de 3600 tr/min, soit : 3600 ; 1800 ; 1200 ; 900 ; etc.

Soit p le nombre de paires de pôles de la machine et la fréquence f de l'alimentation

On a :

$$n_s = \frac{f}{p} \text{ en tr/s ou } n_s = \frac{60f}{p} \text{ en tr/min.} \quad (I.2)$$

n = fréquence de rotation

f = fréquence du courant

p = nombre de paire de pôles

I.3.3. Couple :

La force totale du moteur est la somme des forces qui s'exercent sur les conducteurs:

On l'appelle couple du moteur. Le terme « couple » désigne aussi un travail produisant la rotation d'un axe.

S'il y a une chose plus importante à retenir et à comprendre, c'est déjà que couple et puissance sont deux grandeurs intimement liées. La relation qui les unit est simple :

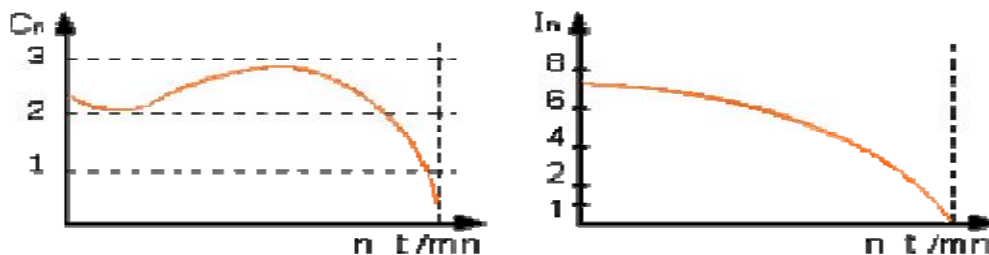
$$P = C \omega \quad (I.3)$$

Où ω est la vitesse de rotation du moteur. P , C et ω sont ici exprimés dans les unités " officielles ", à savoir le Watt, le Newton. Mètre et le radian par seconde. [8]

1.3.4. Démarrage :

1.3.4.a. Démarrage direct

Ce type de démarrage est réservé aux moteurs de faible puissance (90% des moteurs) devant celle du réseau, ne nécessitant pas une mise en vitesse progressive. Le couple est énergétique, l'appel de courant est important (5 à 8 fois le courant nominal). Si nous relevons les valeurs de l'intensité (I) d'un courant et du couple (C) d'un moteur triphasé au moment du démarrage, nous obtenons les courbes suivantes :



Nous observons qu'au moment du démarrage les valeurs de I et de C sont respectivement 7 et 2 fois plus grandes que leur valeur en régime établi

▼ *Avantages:*

Simplicité de l'appareillage, rapidité de la mise en régime

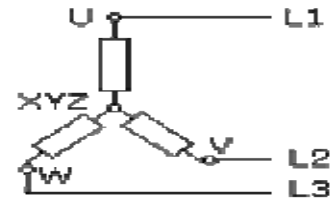
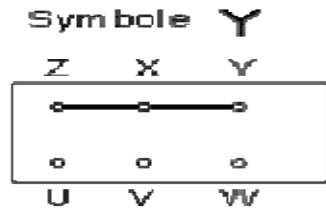
▼ *Inconvénients:*

Démarrage brutal, courant d'appel élevé ce qui perturbe les appareils branchés sur la même ligne (outre la chute de couple qui résulte de la chute de tension). Procédé utilisé pour des puissances inférieure à 10 fois la puissance apparente du réseau ou des moteurs de petite puissance. (EDF impose une puissance utiles inférieure à 1 KW sur le réseau public basse tension.[8])

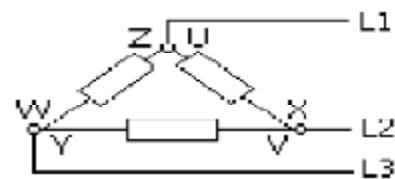
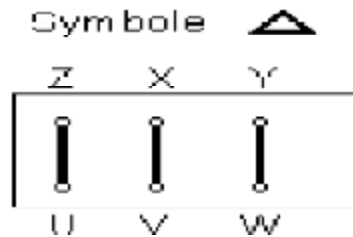
1.3.4.b. Démarrage étoile – triangle

Ce type de démarrage est réservé aux machines démarrant à vide ou dont le couple résistant est faible. L'intensité de démarrage est divisée par 3, mais le couple de démarrage aussi (proportionnel au carré de la tension d'alimentation des enroulements).

Ø Couplage étoile:



Ø Couplage triangle :



Pour réduire l'intensité au démarrage du moteur, l'étude des rapports $I_{\text{Triangle}}/I_{\text{Etoile}}$ nous montre qu'il serait préférable de démarrer un moteur (asynchrone triphasé à rotor en court circuit) en le couplant en étoile. Par contre si l'on veut exploiter le couple et la puissance maximum du moteur il faut le brancher en triangle.

Ø Conditions à remplir :

Le couplage triangle doit correspondre à la tension du réseau.

Le démarrage du moteur doit se faire en deux temps.

Premier temps : couplage des enroulements en étoile et mise sous tension ;

Deuxième temps : suppression du couplage étoile, immédiatement suivie du couplage triangle.

Ø Analyse du fonctionnement au démarrage

Au démarrage le moteur est couplé en étoile. La tension appliquée sur une phase est réduite, soit:

L'intensité absorbée (proportionnelle à la tension appliquée) est le $1/3$ de celle qu'absorberait le moteur s'il démarrait directement en triangle. La valeur de la pointe de l'intensité atteint en général deux fois l'intensité nominale.

Le couple au démarrage (proportionnel au carré de la tension appliquée) et le couple maximum en étoile sont ramenés au $1/3$ des valeurs obtenues en démarrage direct. La valeur du couple de démarrage atteint en général 0,5 fois le couple nominal.

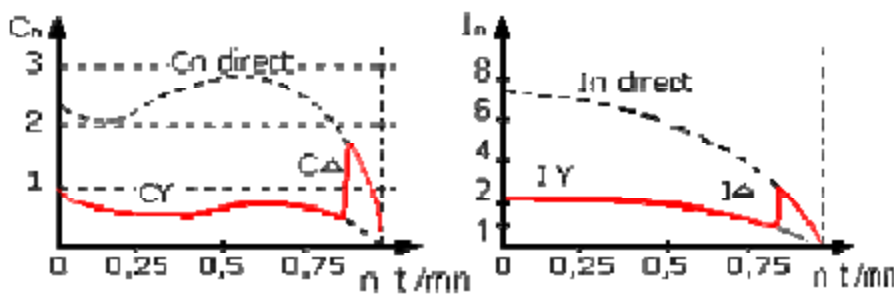
Coupure (passage étoile triangle) :

Le temps de passage entre les deux couplages doit être très bref.

Couplage triangle :

Un deuxième appel de courant se manifeste ; il est fonction de la durée du couplage étoile et peut atteindre la valeur de pointe du démarrage direct. Cette pointe de courte durée provient du fait que les forces électromotrices qui subsistent au stator lors du couplage triangle ne sont pas en opposition de phase avec les tensions de ligne.

Le couple subit une forte pointe pour retomber rapidement à sa valeur nominale



✓ **Avantage:** relativement bon marché

✓ **Inconvénient:** couple de démarrage fixé par l'alimentation, couple réduit au tiers de sa valeur sur toute l'excursion de vitesse.

Mise en régime plus longue et limitée au machine qui démarre à vide. Coupure brutale puis augmentation brutale du courant lors du passage étoile triangle. Démarrage conseillé pour des engins avec des faibles couples résistants au démarrage (pompes centrifuges). [8]

1.3.5 Freinage :

On distingue plusieurs types de freinages :

- **Arrêt libre :** (mise hors tension du stator)
- **Arrêt contrôlé :** Tension statorique progressivement passée à 0 Volt
- **Freinage hypersynchrone :** Lorsque la vitesse du rotor est supérieure à la vitesse du champ tournant, le moteur freine. Couplé à un variateur de fréquence qui diminue progressivement la vitesse du moteur on peut arrêter un moteur.

Le couple de freinage est faible : la courbe du couple en fonction de la vitesse (voir Les trois domaines de fonctionnement de la machine asynchrone) pour différentes valeurs du glissement montre que le couple résistant n'est pas très important pour un glissement compris entre 0 et -1. Cette méthode n'est donc pas très efficace pour freiner rapidement une machine asynchrone. [8]

• **Arrêt 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.

• **Arrêt à contre courant :**

Le principe consiste à inverser 2 phases pendant un court instant. C'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 la surchauffe : on peut prévoir des résistances supplémentaires afin de diminuer l'intensité en ligne. Enfin, avec cette méthode, le couple décélérateur reste négatif même lorsque la vitesse est égale à 0 tr/min, il faut donc prévoir de couper l'alimentation quand la vitesse est nulle (temporisation, contact centrifuge), sinon le moteur part en arrière.

Freinage mécanique : Il est souvent utile de prévoir un dispositif d'arrêt d'urgence du moteur en absence de courant. [8]

1.3.6. Facteur de puissance :

Le facteur de puissance est une caractéristique d'un récepteur électrique.

Pour un dipôle alimenté en régime de courant variable au cours du temps (sinusoïdal ou non), il est égal à la puissance active consommée par ce dipôle divisée par le produit des valeurs efficaces du courant et de la tension. Il est toujours compris entre 1 et 0.

$$f_p = \frac{P}{UI} = \frac{P}{S} \quad (I.4)$$

En particulier, si le courant et la tension sont des fonctions sinusoïdales du temps, le facteur de puissance est égal au cosinus du déphasage entre le courant et la tension. [8]

$$f_p = \cos \varphi \quad (I.5)$$

I.3.7. Les régimes de fonctionnement de la machine asynchrone :

Les régimes de fonctionnement peuvent être définis selon les valeurs que peut prendre le glissement g :

- a) Si $0 < g < 1$: ($0 < n < n_s$) : Dans ce cas le champ statorique tend à accélérer le rotor pour le l'amener au synchronisme. On dit alors que la machine fonctionne en moteur.
- b) Si $-\infty < g < 0$: ($n > n_s$) : Dans ce cas le champ statorique tend à ramener la vitesse de l'arbre au synchronisme. On dit alors que la machine fonctionne en génératrice.
- c) Si $g > 1$ ($n < 0$) : Dans ce cas le champ statorique tend à ramener le rotor à tourner dans son propre sens. On dit alors que la machine fonctionne en frein.

On peut voir bien clairement ces régimes de fonctionnement sur la caractéristique couple/vitesse, sur la (*figure I.9*)

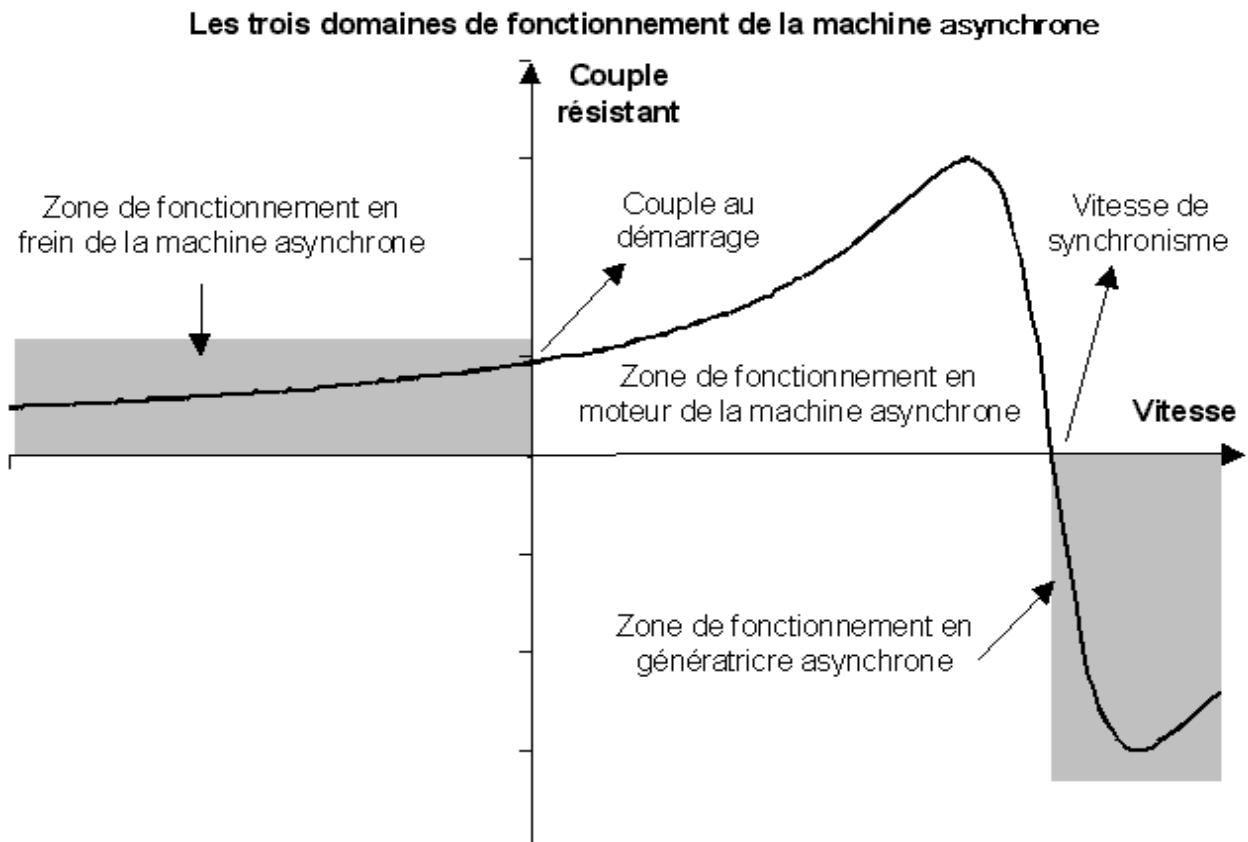


Figure I.9 : Courbe généralisé dans le couple en fonction de la vitesse d'une MAS

I.4.bilan des puissances et des pertes de la machine fonctionnant en moteur :**I.4.1) Puissance électrique absorbée P_a :**

La puissance électrique P_a absorbée [9] par le stator du moteur asynchrone quelque soit le couplage de ses bobines (étoile ou triangle) est :

$$P_a = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad [w] \quad (I.6)$$

Avec

U: tension d'alimentation [v].

I : courant absorbé [A].

$\cos \varphi$: Facteur de puissance.

I.4.2) Pertes joules au stator :

Les pertes par effet Joule dans les enroulements du stator sont

$$P_{js} = 3 \cdot r_1 \cdot I_1^2 \quad [w] \quad (I.7)$$

Avec :

r_1 : la résistance d'une phase statorique en [W].

I_1 : le courant efficace traversant l'enroulement statorique [A].

I.4.3) Les pertes fer au stator :

Les pertes fer P_{fs} sont en fonctions de flux magnétique. Elles ne dépendent que de la tension d'alimentation et de la fréquence des courant statorique .

I.4.4) Puissance transmise dans l'entrefer :

La puissance P_{tr} transmise au rotor à travers l'entrefer est égale à :

$$P_{tr} = P_a - P_{js} - P_{fs} \quad [w] \quad (I.8)$$

I.4.6) Puissance électromagnétique :

La puissance électromagnétique P_{em} transmise au rotor est égale à :

$$P_{em} = P_{tr} - P_{jr} = (1-g) \cdot P_{tr} \quad [w] \quad (I.9)$$

I.4.8) La puissance mécanique :

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

$$P_M = P_{em} - (P_{jr} + P_{fr}) \quad [w] \quad (I.10)$$

Les pertes fer rotoriques négligées donc :

$$P_M = P_{em} - P_{jr} \quad [w] \quad (I.11)$$

I.4.7) Les pertes mécaniques:

Ces pertes prennent en compte tous les frottements dus à la rotation de la partie tournante de la machine, que ce soit des frottements entre solides ou entre solide et fluide.

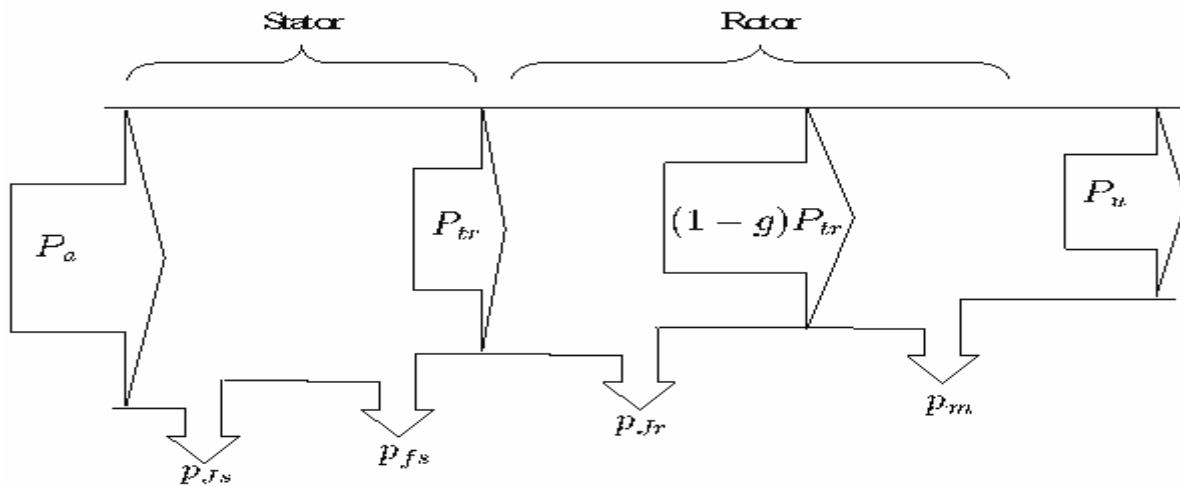
Les pertes proportionnelles à la vitesse de rotation, et regroupent les pertes par frottements et par ventilation. Ces pertes sont pratiquement constantes.

I.4.9) La puissance utile :

C'est la puissance transmise à la charge.

$$P_u = P_M - P_m \quad [w] \quad (I.12)$$

Ø Le schéma ci-dessous représente la transmission de la puissance à travers la machine :



1.5. LES PRINCIPAUX DEFAUTS DANS LA MACHINE ASYNCHRONE A CAGE :

Des multiples défaillances peuvent apparaître dans la machine asynchrone, elles peuvent être prévisibles ou intempestives, mécaniques, électriques ou magnétiques et leurs causes sont très variées. Si l'on élimine les pannes dues à des causes intrinsèques, C'est-à-dire, résultant d'une mauvaise conception (mauvais choix des matériaux), d'une mauvaise fabrication (défauts d'usinage) ou d'un mauvais montage (serrage, désalignement) du moteur, les défaillances d'une machine asynchrone les plus fréquentes qui requièrent une attention particulière sont les suivantes :

1.5.1. défauts de roulements

Statistiquement c'est le défaut le plus répondu dans les moteurs asynchrone, surtout pour les machines de grande puissance, car les contraintes mécaniques sont plus importantes. Celles-ci exigent une maintenance mécanique accrue.

Les défauts de roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication, aussi un mauvais graissage ne permet pas une bonne lubrification et la bonne rotation des roulements qui deviennent rigides, donc cause une résistance à la rotation et par la suite ils s'abîment (se fissurent, s'écaillent).

Classiquement il est diagnostiqué à partir du spectre d'une mesure acoustique vibratoire. La relation entre les vibrations des roulements à billes et le spectre des courants statorique est telle que toutes les excentricités résultantes interfèrent sur le champ d'entrefer de la machine asynchrone [9].

Un défaut de roulement à billes se manifeste par le contact défectueux à répétition avec la cage de roulement. Ce qui implique l'apparition d'une fréquence caractéristique dans le spectre du courant statoriques.

1.5.2. défauts statoriques

Les défauts statoriques sont en fait des défauts d'enroulements statoriques donc des courts-circuits divers au niveau du bobinage du stator dues à la dégradation de l'isolation électrique (surchauffe du moteur, survoltage du moteur, vieillissement des composants...)

On peut citer quatre types de défauts statoriques :

- Court-circuit entre phases statoriques.
- Court-circuit entre spires d'une même phase
- Ouverture d'une phase.
- Défaut du circuit magnétique (ruptures de tôles).

Le court-circuit entre phases provoquerait un arrêt complet de la machine. Cependant, un court-circuit entre spires conduit à un déséquilibre de phases ce qui à une répercussion directe sur le couple électromagnétique.

Tous ces défauts conduisent à une asymétrie de l'impédance totale de la machine [9]. Ce qui se manifeste par l'apparition d'harmoniques spécifiques dans le spectre du courants statoriques. [9].

1.5.3. défauts rotoriques

1-5-3-1-cassure de barres et de portions d'anneau de la cage d'écureuil :

Pour les moteurs asynchrones à cage la rupture partielle ou totale d'une barre rotorique ainsi que la rupture d'une portion d'anneau représente la panne la plus probable et la plus répondu au niveau du rotor.

Leur détection est rendue difficile par le fait que la machine ne s'arrête pas de fonctionner. Par ailleurs ces défauts ont un effet cumulatif, la rupture d'une barre se traduit par l'augmentation de la résistance équivalente de l'enroulement rotorique [9].

Le courant qui traversait la barre cassée se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres à leurs tours seront surchargées, ce qui conduit à leurs futures ruptures jusqu'à l'arrêt de la machine.

Elles provoquent aussi une dissymétrie de répartition des courants au rotor ce qui induit des ondulations importantes du couple électromagnétique et de la vitesse rotorique, générant des vibrations et l'apparition de défauts mécaniques.

Ces défauts seront diagnostiquer par l'apparition de composantes oscillants à des fréquences [9].

I-5-3-2 Défauts d'excentricité rotorique :

Appelée aussi dissymétrie du rotor, elle est le résultat de la non uniformité d'entrefer. Ce défaut peut survenir suite à la flexion de l'arbre moteur, un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator, l'usure des roulements, un mauvais graissage, un déplacement du noyau statorique...etc.

L'excentricité provoque la variation de l'entrefer donc une répartition non homogène des courants dans le rotor et un déséquilibre des courants statoriques. La résultante des forces magnétique radiales (traction magnétique) se trouve déséquilibrée. Lorsque cette excentricité s'accroît, elle peut causer un frottement du rotor avec le stator endommageant le circuit magnétique et l'enroulement statorique.

Il existe trois types d'excentricité pouvant apparaître dans la machine :

1. L'excentricité statique : le centre de rotation de l'arbre du rotor est différent du centre géométrique de la machine.
2. L'excentricité dynamique : le centre de rotation de l'arbre du rotor tourne autour du centre géométrique de la machine.
3. L'excentricité mixte : c'est la somme des deux précédentes.

La présence de l'excentricité se manifeste par la création d'harmonique dans les spectres des courants à des fréquences données [9].

I.6. Conclusion :

Nous avons, dans ce chapitre, donné quelques rappels sur la machine asynchrone à cage d'écureuil et son principe de fonctionnement ainsi son bilan de puissances. En suite, nous avons fait la classification de défauts (types, causes, effets) pouvant affecter la machine asynchrone triphasée.

Dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser aux matériaux entrant dans la construction de la machine asynchrone.

Chapitre II

*» Matériaux et Techniques de conception
des machines Asynchrones*

II-1-Introduction :

L'objectif visé à travers ce chapitre est de présenter les différents matériaux d'électrotechnique, nous nous intéressons aux matériaux conducteurs, matériaux magnétiques et matériaux isolants. Cette partie est basée sur la recherche bibliographique.

II-2. Les matériaux d'électrotechniques :

Les machines électrique, connue depuis le siècle dernier, ainsi que l'ensemble du matériel électrique évoluent vers une plus grande compacité, grâce à l'amélioration des matériaux qui le constituent.[10]

II-2-1.Classification :

Ces matériaux peuvent être classés en quatre groupes selon leur fonction :

- § Les matériaux conducteurs pour véhiculer le courant électrique.
- § Les matériaux isolant pour isoler les conducteurs électriques.
- § Les matériaux magnétiques pour créer ou canaliser l'induction magnétique.
- § Les matériaux semi-conducteurs pour la fabrication des interrupteurs électronique de puissance

II-2-2.Les Matériaux conducteurs

De tous les solides, l'argent est le meilleur conducteur d'électricité mais, en raison de son coût prohibitif, son usage est restreint aux contacts destinés à l'ouverture et à la fermeture des circuits électriques. Paradoxalement, il sert aussi comme élément résistif dans certains fusibles. Dans les applications générales, le matériau le plus employé est le cuivre.

On utilise des conducteurs d'aluminium (seuls ou avec des fils d'acier) pour les lignes de transport d'énergie, car, pour une même longueur et un même poids, la résistance électrique de l'aluminium est sensiblement la moitié de celle du cuivre.

II-2-2-2. Formes des conducteurs

Suivant leurs applications, les conducteurs prennent une grande variété de formes : on les rencontre sous forme de fils de section ronde, carrée ou plate, sous forme de câbles toronnés et sous forme de barres (barres omnibus).

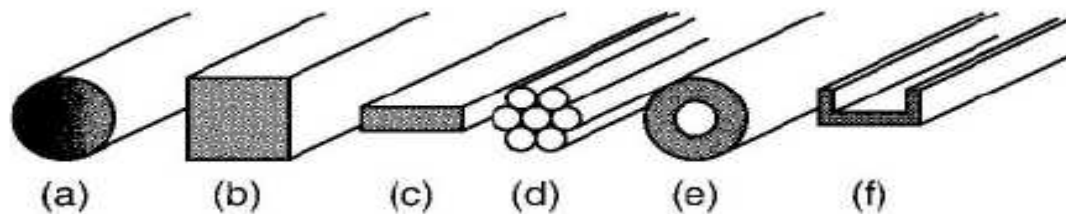


Figure II-1 : Diverses formes de conducteurs.

Les conducteurs se présentent généralement sous forme de fils de section ronde (**Fig . II-1a**), obtenus directement par tréfilage.

Les fils bons conducteurs de sections carrée et rectangulaire (**Fig . II-1b, c**) sont employés pour les enroulements à grande section des transformateurs et des machines rotatives. L'emploi de tels conducteurs dans les moteurs et génératrices permet une meilleure utilisation du volume des encoches. Les conducteurs constitués par un grand nombre de petits fils (appelés torons) torsadés ensemble sont très souples (**Fig . II-1 d**). La pose des câbles de grande section est ainsi facilitée. Dans le cas de certains conducteurs d'aluminium, un ou plusieurs fils centraux sont en acier afin d'assurer une plus grande résistance mécanique du câble. Pour les fortes intensités de courant rencontrées dans les centrales et les postes de transformation, on utilise des conducteurs nus de formes particulières qui assurent une meilleure dissipation de la chaleur ou qui possèdent une plus grande rigidité mécanique (**Fig . II-1 e, f**).

Enfin, on utilise des conducteurs résistifs de sections ronde, carrée et plate dans la fabrication des chaufferettes. Des démarreurs de moteurs et des rhéostats.

II.2.3. Propriétés des matériaux conducteurs

Nous ne retiendrons que les propriétés plus nécessaires en électrotechnique.

II.2.3.1. Propriétés électrique :

▼ Résistance d'un conducteur

À une température donnée, la résistance d'un conducteur dépend :

1. De sa longueur
2. De sa section
3. De la nature de la substance qui le constitue

La formule qui donne la relation entre la résistance d'un conducteur et les trois facteurs énumérés plus haut est la suivante :

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (\text{II.2})$$

où

R = résistance du conducteur, en ohms [Ω]

p = résistivité de la substance, en ohm-mètres [Ωm]

l = longueur du conducteur, en mètres [m]

A = section du conducteur, en mètres carrés [m^2]

II.2.3.2. Propriétés mécaniques :

▼ Résistance à la traction

la résistance des conducteurs à la traction joue un rôle important lors de la pose des lignes aériennes et du bobinage des enroulements. D'abord, il ne faut pas que la tension subie par le conducteur dépasse la tension de rupture. On ne doit pas non plus provoquer un allongement tel que le conducteur ne puisse plus reprendre sa longueur et sa forme originales. Ces deux considérations demandent une connaissance des forces qui peuvent changer sa longueur de façon permanente.

▼ Traction et allongement :

Si l'on augmente la force de traction F exercée sur un fil métallique, tout en observant son allongement, on obtient une série de valeurs que l'on peut porter sur un graphique (Fig. II-2). Sur cette courbe, nous avons indiqué trois points importants a, b et c, correspondant respectivement aux forces de traction F_1 , F_2 et F_3 . À mesure que la force de traction croît de 0 à F_1 , le fil s'allonge d'une distance dl .

Dans la partie droite Oa de la courbe, l'allongement d est proportionnel à la traction exercée et le fil se comporte comme un ressort. Il reprend sa forme originale dès que la traction cesse.

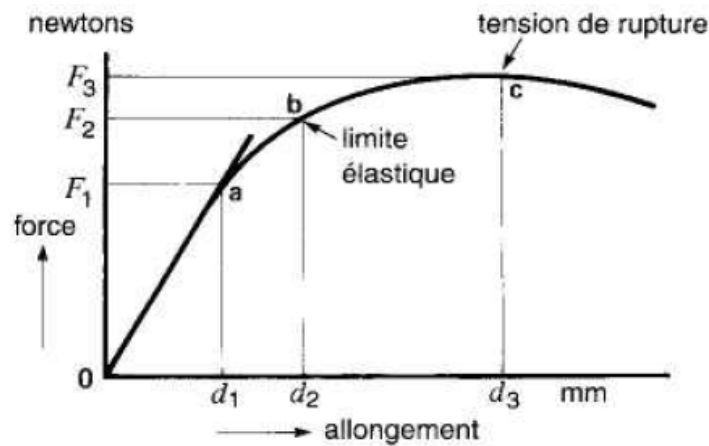


Figure II-2 : Allongement d'un fil en fonction de la force de traction.

Tous les conducteurs possèdent de telles courbes de traction mais les forces F1, F2 et F3 varient beaucoup suivant le métal. La forme de la courbe dépend aussi de la température, les forces devenant plus petites et l'allongement plus grand quand la chaleur augmente. Enfin, la valeur des forces varie beaucoup suivant que le conducteur a été formé à froid, à chaud ou qu'il a été recuit.

II.2.3.3. Propriétés physique et chimique :

▼ Propriétés physiques :

- **La masse volumique :** C'est la masse de l'unité de volume d'un matériau, on l'exprime par kg/m^3 ou bien g/cm^3 .
- **Point de fusion :** un matériau à l'état liquide, toujours à la même température, il est exprimé en degré Celsius.
- **Dilatation:** une barre chauffée s'allonge d'autant qu'elle est portée à une température plus élevée.

On définit le coefficient de dilatation α pour chaque matériau comme suit :

Connaissant la longueur d'une barre à 0°C , on peut déterminer sa longueur à une température T° par la relation suivante : $L_T = l_0(1 + \alpha \Delta T)$

ΔT : Différence de la température entre 0° et T°

l_0 : Longueur à 0°C .

L_T : Longueur à $T^\circ\text{C}$.

▼ Propriétés chimique :

La plupart des métaux sont attaqués par des acides, alors les matières plastiques sont insensibles aux agents chimiques.

II.2.4. Matériaux magnétiques :

Le fonctionnement des machines électriques est basé sur la production d'un champ magnétique, 50% du poids de ces machines est due à des matériaux magnétiques. Ces derniers réagissent différemment lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique.

II.2.4.1. Définition des matériaux magnétiques :

Chaque matériau est caractérisé par une excitation magnétique (H) et une induction magnétique (B), lorsqu'on augmente l'excitation H dans une bobine munie d'un noyau magnétique, l'induction B varie selon une courbe appelée courbe de première aimantation, représentée sur la *figure II.4*.

On distingue trois zones : le premier linéaire, puis le coude de saturation et la zone de saturation. Pour situer l'influence des matériaux, la *Figure II.4* présente différentes courbes de première aimantation.

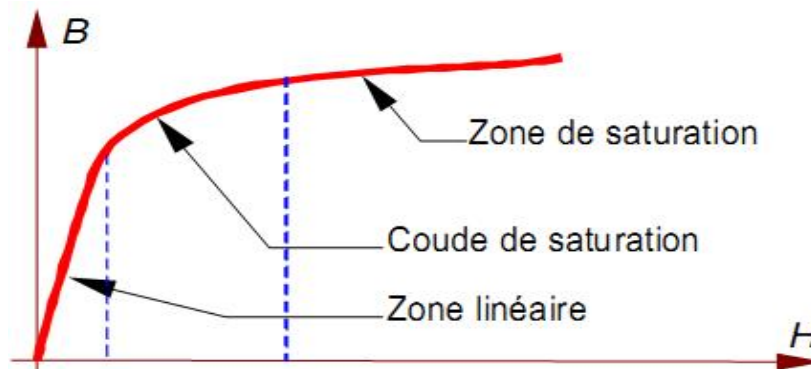


Fig II.3 : décomposition de la courbe de première aimantation

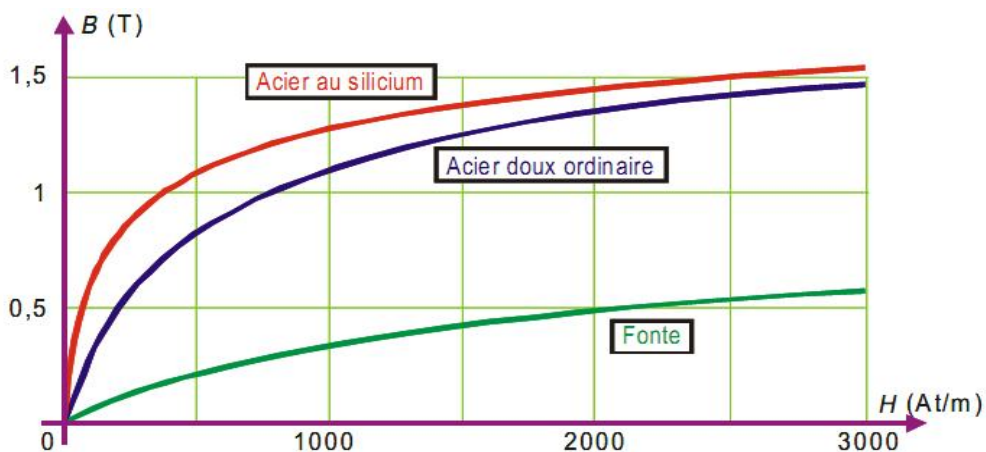


Fig II.4 : courbes de première aimantation de matériaux courants.

II.2.4.2. Classification des matériaux d'un point de vue magnétique

Les différents comportements magnétiques des trois catégories de matériaux peuvent être illustrés par le graphe de la Figure II.5.

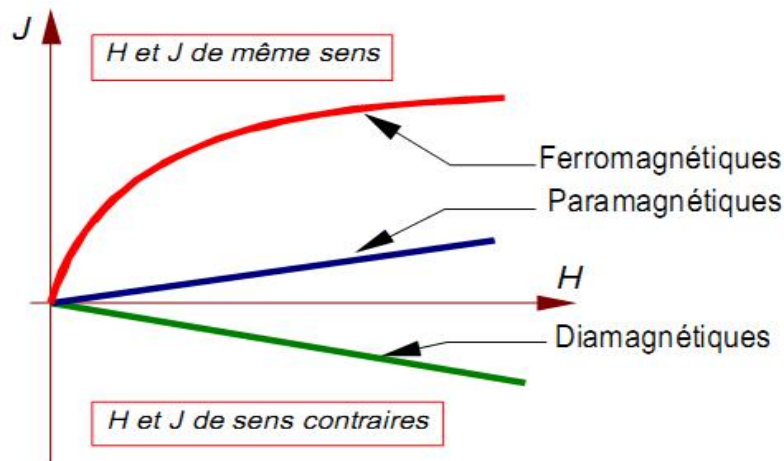


Fig II.5. Illustration des comportements magnétiques.

a-Matériaux diamagnétiques :

Ils s'aimantent faiblement dans le sens opposé au champ magnétisant. Leur aimantation cesse dès que le champ magnétisant est supprimé.

Les matériaux diamagnétiques s'aimantent proportionnellement au champ dans lequel ils sont placés, mais en sens inverse. Le rapport entre la valeur de l'aimantation du corps et celle du champ qui le produit est faible

Exemples : Cuivre, Zinc, Or, Argent

b-Matériaux paramagnétiques :

Ils s'aimantent faiblement dans le sens du champ magnétisant. Leur aimantation cesse dès que le champ magnétisant est supprimé.

Les matériaux paramagnétiques présentent une aimantation proportionnelle au champ dans lequel ils sont placés, et de même sens. Le rapport entre la valeur de l'aimantation du corps et celle du champ qui le produit est faible

Exemples : Aluminium, Platine, Manganèse...

C-Matériaux ferromagnétiques :

Ils peuvent être fortement magnétisés. Leur aimantation persiste plus ou moins lorsque le champ magnétisant est supprimé.

Les matériaux ferromagnétiques sont capables de s'aimanter de manière beaucoup plus forte. Leur aimantation est de même sens que le champ inducteur, mais elle n'est pas proportionnelle. Elle croît avec le champ inducteur et tend vers une limite

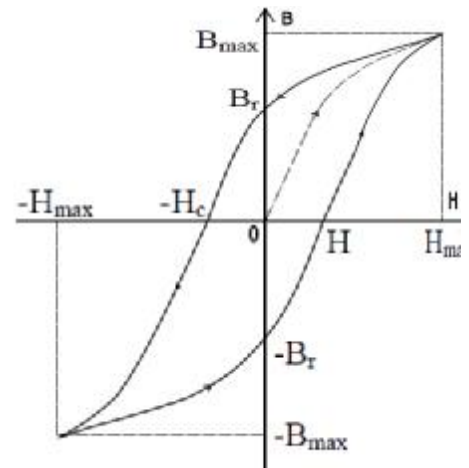
Exemples : Fer, Nickel , Acier , Cobalt

- **Cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique :**

On trace l'évolution du champ magnétique dans un matériau ferromagnétique en fonction d'une excitation magnétique alternative variant entre $-H_{max}$ et H_{max}

- B_r : **champ rémanent**, c'est à dire le champ restant dans le matériau lorsque $H = 0$ A.m-1.

- H_c : **excitation coercitive**, c'est à dire l'excitation qu'il faut produire pour annuler le champ magnétique dans le matériau ferromagnétique



On appelle **HYSTERESIS**, le dédoublement de la courbe d'aimantation $B = f(H)$ mettant en évidence le retard à la désaimantation des matériaux ferromagnétiques. Le phénomène d'hystérésis est responsable de l'échauffement des tôles des circuits magnétiques soumis à des champs variables.

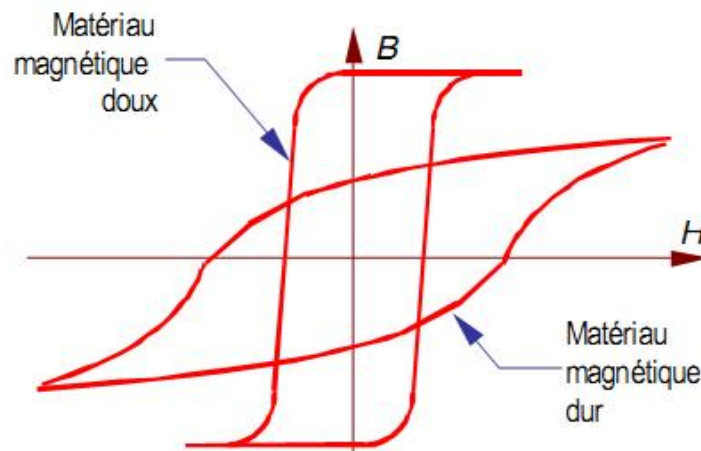
- **Classification des matériaux ferromagnétiques :**

L'observation des cycles d'hystérésis permet de regrouper les matériaux ferromagnétiques en deux catégories :

- **Matériaux ferromagnétiques doux :**

- * Cycle d'hystérésis étroit
- * Champ rémanent B_r et excitation coercitive H_c faibles
- * Pertes par hystérésis faibles
- * Ils s'aimantent et se désaimantent très facilement

On les utilise pour réaliser des circuits magnétiques de machines (moteurs, génératrices, transformateurs, ...)



– **Matériaux ferromagnétiques durs :**

- * Cycle d'hystérésis large
- * Champ rémanent B_r et excitation coercitive H_c importants
- * Pertes par hystérésis importantes
- * Ils s'aimantent et se désaimantent très difficilement

On les utilise pour réaliser des aimants permanents.

II.2.4.3. Matériaux ferromagnétiques laminés et ses alliages

Les machines électriques soumettent dans la plupart des cas les circuits magnétiques à des champs alternatifs. Afin de limiter les courants de Foucault induits dans ces circuits sous l'effet de la conductivité, on utilise généralement les alliages magnétiques sous forme de tôles isolées. Trois familles d'alliages ont percé le marché des matériaux laminés : les alliages Fer-Silicium, les alliages Fer-Cobalt et les alliages Fer-Nickel [11].

Ces trois familles de tôles montrent à quel point, en termes de performances magnétiques, le choix final impose une définition très précise du cahier des charges de l'application visée. Considérant uniquement le champ d'investigation de la machine tournante, trois critères purement électromagnétiques doivent être considérés : le niveau de saturation, la perméabilité et les pertes massiques. Dans ces conditions, les courbes ci-dessous montrent clairement qu'un compromis s'impose [12].

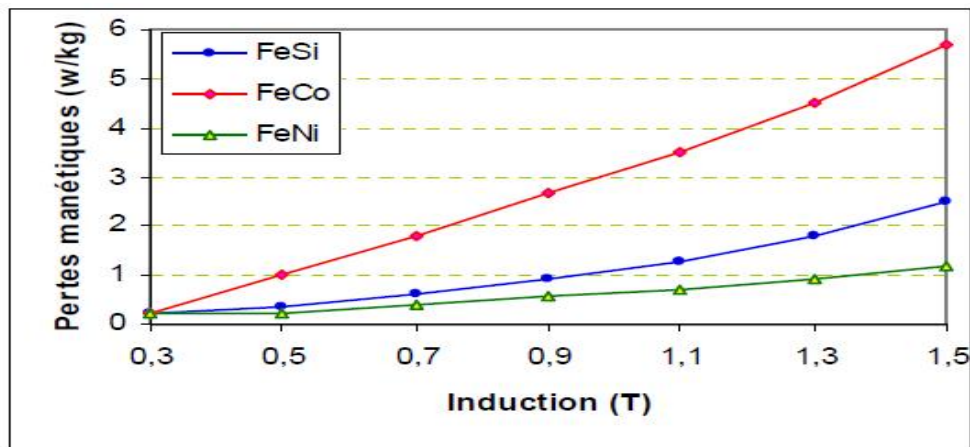


Figure II-6 : Comparaison des pertes fer, pour les alliages FeSi, FeCo, FeNi sous champ à 50Hz.

Alliages	Perméabilité	Niveau de saturation
Alliages Fer Silicium	10000	2T
Alliages Fer Nickel	80000	1.6T
Alliages Fer Cobalt	20000	2.4T

Tableau II.1 : Caractéristiques d’usage typique des alliages FeSi, FeCo et FeNi.

Ceci étant, d’autres critères ne doivent en aucun cas être occultés et permettent dans bien des cas de sélectionner objectivement une famille de tôles. Ainsi en est-il de la prise en compte des propriétés mécaniques et thermiques, qui pour des applications à contraintes sévères, sont souvent déterminantes.

II-2-5. L’isolation des machines électriques :

L’isolation est déterminante pour la durée de vie et le bon fonctionnement de la machine, les isolants utilisés pour la construction des machines électriques sont choisis suivant la température de fonctionnement (Dans notre cas pour une classe d’isolation **F**, c’est-à-dire 105°C).

Ø Classe d'isolation

Les limites d'échauffement des machines électriques à refroidissement en air sont données par le tableau suivant (II.2), d'après les normes CEI 34-1/1994-03 :

Classe d'isolation	Echauffement limite (°C)
A	60
E	75
B	80
F	105
H	125

Tableau II.2 : Classe d'isolation en fonction de la température.

Afin de satisfaire ces conditions on utilise deux produits disponibles sur le marché et qui supportent en service continu des températures de 250°C :

1. Vernis à base de résine synthétique (pour les fils conducteurs et l'imprégnation).
2. Toile vernis (pour les encoches et les têtes de bobines).

On distingue trois types d'isolation :

II.2.5.1 Isolation des tôles :

Pour déterminer le courant de Foucault dans le circuit magnétique, on utilise des feuilles d'acier qui sont imprégnées de vernis sur une seule surface.

II.2.5.2. Isolation des enroulements :

L'isolation des enroulements se scinde en trois parties :

a. L'isolation des conducteurs

Afin d'éviter les courts-circuits, on a choisis les fils conducteurs émaillés c'est-à-dire isolés avec des vernis à base de résine synthétique. Leurs bobinages ne doit pas se faire à basse température car le pliage des fils peut provoquer des fentes dans les vernis.

b. L'isolation des Encoches :

Les circuits magnétique doit être isolé des conducteurs afin d'éviter la mise à la masse du bobinage. Pour cela, on place sur tout le contour de l'encoche (sur toutes parois) un isolant constitué de toile vernie.

Après la pose de la première couche de l'enroulement, on ajoute deux cales de la même toile vernie, vient ensuite la deuxième couche de l'enroulement qu'on couvre d'une cale identique aux précédentes puis une clavette en bois de vernis qui fermera l'encoche.

c. L'isolation des parties frontales :

Les têtes de bobinage se trouve sur les partie frontales du stator seront isolés séparément en les enrubannant avec de la toile vernie.

II.3. Conclusion :

Après avoir donné une idée générale sur les matériaux électrotechniques entrant dans la construction des machines asynchrone, nous passons au chapitre rapportant certains lois de calcul des paramètres du moteur (électromagnétique, magnétiques, électriques, les pertes et les pertes performances de ce dernier) , qu'il nous avons jugé utiles pour notre travail, en élaborant un code de calcul sous environnement Matlab.

Chapitre III

» *Dimensionnement du moteur asynchrone par élaboration
d'un code de calcul sous environnement Matlab.*

III.1. Introduction :

L'établissement d'un projet d'une machine asynchrone commence par le choix des dimensions, dans ce chapitre, nous déterminons toutes les dimensions géométriques, magnétiques et électriques du stator et du rotor ainsi que l'épaisseur de l'entrefer d'une machine asynchrone triphasée. Tout en respectant les critères liés à sa construction, à son exploitation économique, ainsi qu'à sa maniabilité.

III.2. Dimensionnement de la machine asynchrone:

III-2-1-Calcul de la partie statorique :

a- Longueur virtuelle de l'induit:

C'est la longueur du paquet de tôles statorique, elle est donnée par :

$$L_i = \frac{P_e \cdot 6,1 \cdot e^{12}}{K_f \cdot K_{enr1} \cdot N_s \cdot A \cdot \alpha_1 \cdot B_d \cdot D_{1int}^2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-1})$$

Avec :

$$K_f = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \quad \text{-Coefficient de la forme de l'onde d'induction dans l'entrefer}$$

$$D_{1int} = 64,78 \quad [\text{mm}] \quad \text{-diamètre intérieur du stator}$$

$$K_{enr1} = 0,9 \quad \text{-coefficient de l'enroulement.}$$

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} = 0,61 \quad \text{-Coefficient de recouvrement polaire.}$$

N_s : vitesse de la rotation au synchronisme en tr/min

B_d : Induction magnétique dans l'entrefer.

A : la charge linéaire

b-la puissance électromagnétique :

C'est la puissance transmise au rotor à travers l'entrefer, elle est donnée par l'expression suivante :

$$P_e = K_e \cdot \frac{P_n}{h \cdot \cos\varphi} \quad [\text{W}] \quad (\text{III-2})$$

$0.95 < K_e < 0.98$ – K_e Coefficient de majoration de la tension.

P_n : puissance utile nominale.

h : Rendement du moteur.

$\cos\varphi$: facteur de puissance.

c-nombre des pôles :

$$P = \frac{60 \cdot f_1}{N_s} \quad (\text{III-3})$$

f_1 : la fréquence du courant statorique.

d-coefficient de longueur :

Est le rapport entre la longueur L_i et le diamètre intérieur D_{1int} de tôle de stator.

$$l_i = \frac{L_i}{D_{1int}} \quad (\text{III-4})$$

e-Courant dans la phase statorique :

$$I_1 = \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_n \cdot \cos\varphi} \quad [\text{A}] \quad (\text{III-5})$$

U_n : tension nominale.

f-nombre de conducteur par encoche :

C'est le nombre de conducteurs effectifs dans une encoche est donné par la formule suivante :

$$U_{en1} = \frac{A.t_1.a_1.10^{-3}}{I_1} \quad \text{(III-6)}$$

$a_1 = 2$. -nombre de voies parallèles.

g-nombre d'encoche par pôle et par phase :

$$q_1 = \frac{Z_1}{2.p.m_1} \quad \text{(III-7)}$$

Z_1 : nombre d'encoches statorique.

m_1 : nombre de phases du stator.

h-calcul de la zone phasique :

$$\alpha = \frac{2.\pi.p.q_1}{z_1} \quad \text{(III-8)}$$

i-nombre de spire :

$$W_1 = \frac{U_{en1}.Z_1}{2.a_1.m_1} \quad \text{(III-9)}$$

$m_1 = 3$. -nombre de phase du stator

j-pas d'enroulement :

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

$$Y_1 = \frac{Z_1}{2.p} + \varepsilon \quad \text{[mm]} \quad \text{(III-10)}$$

ε : Pas de raccourcissement

k- Pas polaire :

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

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{1int}}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-11})$$

l-pas d'dentaire :

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_{1int}}{Z_1}$$

m- Diamètre moyen du stator :

$$D_{Imoy} = \frac{D_{1int} \cdot D_{1ext}}{2} + l. \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-12})$$

n-Section effective d'un conducteur de l'enroulement :

Elle est calculée par l'expression suivante :

$$S_{eff} = \frac{I_n}{a_1 \cdot j_1} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III-13})$$

J_1 : Densité de courant dans l'enroulement statorique, elle varie entre (2÷14) [A/mm²].

NB : Si la section effective calculé supérieur à 1.8 mm², on doit diviser celle-ci en sections élémentaires, et comme la section des conducteurs est normalisée, on choisira la section standard la plus proche de celle calculée.

$$S_{el} = \frac{S_{eff}}{N_{el}} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III-14})$$

N_{el} : nombre de conducteurs élémentaires.

Les sections normalisées sont données par le tableau III.1 (voir l'annexe.)

III-2-2-Dimensionnement de la feuille statorique :

Afin de bien déterminer les dimensions de la feuille statorique on choisi un type d'encoche est dans notre cas on a choisis l'encoche ovale semi-ouverte elle est donné par la figure(III.1).

a-La largeur de la dent statorique :

La largeur de la dent est calculée à partir de la loi de la conservation du flux à travers le pas dentaire, elle est représenté dans la figure 4.b, elle est donnée comme suit :

$$b_{z1} = \frac{t_1 \cdot B_d}{K_{fer} \cdot B_{z1max}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-15})$$

K_{fer} : Coefficient de remplissage du paquet des tôles statorique et rotoriques .

$$K_{fer} = 0.95 \quad \text{pour l'isolation avec oxydation}$$

$$K_{fer} = 0.97 \quad \text{pour l'isolation en vernie}$$

B_{zmax} : Induction maximale dans la dent statorique en [T], elle est donnée par le tableau III.2 (voir l'annexe).

b-Hauteur du dos statorique :

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

$$h_{c1} = \frac{0.5 \cdot \alpha_1 \cdot \tau \cdot B_d}{K_{fer} \cdot B_{c1max}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-16})$$

$B_{c1} = [1.5 \div 1.65]$ - Induction magnétique dans le dos du stator

c-Hauteur de la dent :

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

$$h_{z1} = 0.5 \cdot (D_{1ext} - D_{1int}) - h_{c1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-17})$$

D_{ext} : Diamètre extérieur de stator en [mm]

d -La largeur minimale de l'encoche statorique :

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

$$b_{enm1} = \frac{\pi \cdot (D_{1ext} + (0,2 \cdot h_{z1}))}{Z_1} - b_{z1}. \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-18})$$

- **La largeur minimale de l'encoche statorique :**

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

$$b_{enm2} = \frac{\pi \cdot (D_{1ext} + (2 \cdot h_{z1}))}{Z_1} - b_{z1}. \quad [\text{mm}]$$

e- La hauteur utile de l'encoche statorique :

$$h_{enc1} = h_{z1} - (h_{K1} + h_{f1}) - \frac{b_{enm2}}{2}. \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-19})$$

$$h_{f1} = [0,8 \div 1,8] \quad \text{-hauteur de la fente de l'encoche statorique.}$$

f-Section l'encoche statorique :

$$S_{enc1} = \left(\frac{b_{en1} + b_{enm1}}{2} \right) \cdot h_{enc1} + \frac{\pi \cdot r^2}{2} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III-20})$$

$$r = 3,566. \quad \text{-le rayon de la tête de l'encoche statorique}$$

g-Section occupé par la cale de fermeture :

$$S_{cal} = L_{cal} \cdot e_{cal} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III-21})$$

$$L_{cal} = 4. \quad \text{- la largeur de la cale de fermeture}$$

$$e_{cal} = 0,4. \quad \text{- épaisseur de la cale de fermeture}$$

h -La section occupée par le caniveau :

$$S_{can} = \left(\frac{2 \cdot h_{z1} \cdot e_{can}}{\cos \frac{Q}{2}} \right) + \left(\frac{2 \cdot r \cdot e_{can}}{2} \cdot \pi \cdot e_{cal} \right) \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III-22})$$

$$e_{can} = 0,4. \quad [\text{mm}] \quad \text{- épaisseur de papier isolant.}$$

$$Q = 10 \quad \text{-l'angle entre deux parois d'encoches statorique.}$$

i - La section occupé par l'isolation statorique :

$$S_{iso} = S_{cal} + S_{can} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III-23})$$

J - La section occupé par les conducteurs dans l'encoche :

$$S_{en1} = S_{enc1} - S_{iso} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III-24})$$

k- Coefficient de remplissage des encoches :

Le coefficient de remplissage est défini comme étant le rapport de la section des conducteurs occupant l'encoche à la section utile de l'encoche, il doit varier dans l'intervalle $[0.7 \div 0.75]$, il est donné par l'expression :

$$K_{rem} = \frac{N_{el} \cdot U_{en1} \cdot d_{iso}^2}{S_{en1}} \quad (\text{III-25})$$

Avec :

$d_{iso} = 0.915$ -diamètre de l'isolation.

$N_{el} = 3$.

l-hauteur de la clavette :

$$h_{kl} = 0,5 \cdot (b_{enm1} - b_{f1}) \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-26})$$

$b_{f1} = 3.93$ - largeur de la fente de l'encoche.

m-Vérification des charges électromagnétique :

Après avoir calculé le nombre de conducteurs effectifs dans une encoche et choisi la section normalisée, on passera à la vérification de la charge linéaire A, l'induction B_{en1} et le flux Φ .

- **La charge linéaire :**

La charge linéaire est le nombre d'ampère par mètre sur la périphérie d'induit :

$$A = \frac{I_1 \cdot U_{en1}}{t_1 \cdot a \cdot 10^{-3}} \quad [\text{A/m}] \quad (\text{III-27})$$

- **flux utile par pôle :**

$$\Phi = \alpha_1 \cdot \tau \cdot l_i \cdot B_d \cdot 10^{-6} \quad [\text{Weber}] \quad (\text{III-28})$$

$\alpha_1 : 0.61$ -Coefficient de recouvrement polaire.

- **Induction magnétique dans le dos satorique :**

$$B_{enI} = \frac{D_{1ext} + (2 \cdot h_{z1})}{Z_1} + b_{z1} \quad [\text{T}] \quad (\text{III-29})$$

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

Induction magnétique dans l'entrefer caractérise l'utilisation magnétique :

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_1 \tau \cdot L_i \cdot 10^{-6}} \quad [\text{T}] \quad (\text{III-30})$$

n-choix de l'entrefer :

Pour des raisons mécanique, on choisi l'entrefer aussi grand que possible pour réduire les pertes supplémentaire dans le fer produite par les pulsations de champ. 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 minimale. L'épaisseur de l'entrefer est liée à la puissance de la machine et il dépend de la d'hauteur d'axe et le nombre de paires de pôles.

III-2-3-Dimensions du rotor :

Le rotor est à cage d'écureuil, celui-ci est constitué de barres logées dans les encoches ovales fermées, court-circuités à leurs extrémités. Ce type d'encoche est donné par la figure(III.2)

a- Choix de nombre d'encoches rotorique :

Pour éviter les couples vibration préés par les harmoniques des forces magnétomotrice et le bruit crée par attraction entre les dents du stator et les dents de rotor, ainsi la pulsation périodique du flux, on choisit le nombre d'encoches du rotor différent de celui du stator, ($Z_1 \neq Z_2$).

a- Diamètre extérieur de rotor :

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

$$D_{2ext} = D_{1int} - 2 \cdot d \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-31})$$

Avec :

$$d = 0.4 \quad [\text{mm}] \quad \text{-l'épaisseur de l'entrefer.}$$

- **Diamètre intérieur de rotor :**

$$D_{2int} = 0.32 \cdot D_{2ext} \quad [\text{mm}]$$

- **Pas polaire rotorique :**

$$\tau_{p2} = \frac{\pi \cdot D_{2ext}}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}]$$

- **Pas dentaire rotorique :**

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

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_{2ext}}{Z_2} \quad [\text{mm}]$$

Avec :

$$Z_2 = 28 \quad \text{-le nombre d'encoche de rotor}$$

D_{2ext} : Le diamètre extérieur de rotor.

b- Le courant dans la barre rotorique :

En générale, le courant dans une phase d'enroulement rotorique est donné par :

$$I_2 = 2 \cdot K_i \cdot \frac{m_1 \cdot I_1 \cdot W_1 \cdot K_{enr1}}{Z_2} \quad [\text{A}] \quad (\text{III-32})$$

Avec :

$$K_{enr1} = 0.9 \quad \text{-coefficient de l'enroulement statorique.}$$

III.2.4. dimensionnement de la feuille rotorique :

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

a- Hauteur de la culasse rotorique :

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

$$h_{c2} = \frac{0.5 \cdot \alpha \cdot \tau \cdot B_d}{K_{2fer} \cdot B_{c2}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-33})$$

Avec :

$K_{2fer} = 0.975$. -coefficient de remplissage des tôles rotorique.

$B_{c2} = 1.4$. [T] -induction dans la culasse rotorique

b- Hauteur de la dent rotorique :

La hauteur de la dent est donnée par la formule :

$$H_{z2} = 0,5 \cdot (D_{2est} - D_{2int}) - h_{c2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-34})$$

c- Largeur de la dent rotorique :

$$b_{z2} = \frac{t_2 \cdot B_d}{K_{fer} \cdot B_{z2max}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-35})$$

Avec :

$B_{z2max} = 1.95$ [T] -induction admissible dans la dent rotorique.

d- Le rayon de la tête extérieur de l'encoche :

$$r_1 = 2 \cdot \frac{\pi \cdot (D_{2ext} - 2 \cdot h_{z2}) - (Z_2 \cdot b_{z2})}{Z_2 + \pi} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-36})$$

e- Le rayon de la tête intérieur de l'encoche :

$$r_2 = 2 \cdot \frac{\pi \cdot (D_{2ext} - 2 \cdot h_{f2}) - (Z_2 \cdot b_{z2})}{Z_2 - \pi} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-37})$$

$h_{f2} = 1$ -la hauteur de la fente rotorique.

f- Diamètre supérieur de l'encoche :

$$d_2 = r_1 \cdot 2 \quad [mm] \quad (III-38)$$

g- Diamètre inférieur de l'encoche :

$$d_{2m} = r_2 \cdot 2 \quad [mm] \quad (III-39)$$

h- Hauteur utile de l'encoche rotorique :

$$h_{enc2} = h_2 + 0,5 \cdot (d_2 + d_{2m}) \quad [mm] \quad (III-40)$$

Avec :

$$h_2 = (h_{z2} - h_{f2}) - 0,5 \cdot (d_2 + d_{2m}) \quad [mm] \quad \text{-Hauteur entre les axes de l'encoche}$$

i- Densité de courant dans la barre rotorique

Elle est donnée par la formule suivante :

$$j_2 = \frac{I_2}{S_{enc2}} \quad [A/mm^2] \quad (III-41)$$

Avec :

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

$$S_{enc2} = ((b_{en2} + b_{enm2}) \cdot h_{2enc}) + \frac{(\pi \cdot r_1^2)}{2} + \frac{\pi \cdot r_2^2}{2} \quad [mm^2] \quad (III-42)$$

j- Cage rotorique :

La cage rotorique est à barre d'aluminiums logés dans des encoches ovales fermées court-circuitées à leurs extrémités par deux anneaux.

• Section de la barre :

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

$$S_b = 0,125 \cdot (d_2^2 + d_{2m}^2) \cdot \pi + 0,5 \cdot (d_2 + d_{2m}) \cdot h_2 \quad [mm^2] \quad (III-43)$$

k- Dimensionnement de l'anneau :

- **Section de l'anneau :**

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

$$S_{an} = (0,35 \div 0,45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_b}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III-44})$$

- **La hauteur de l'anneau :**

La hauteur de l'anneau exprimé comme suit :

$$h_{an} = (1,1 \div 1,25) \cdot h_{z2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-45})$$

- **La largeur de l'anneau :**

La largeur de l'anneau exprimé comme suit :

$$b_{an} = \frac{S_{an}}{h_{an}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-46})$$

- **Diamètre moyen de l'anneau :**

Le diamètre moyen de l'anneau exprimé comme suit

$$D_{an} = D_2 - h_{an} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-47})$$

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

Elle s'exprime comme suit :

$$j_{an} = \frac{I_{an}}{S_{an}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-48})$$

Avec :

$$I_{an} = \frac{I_2}{K_{red}} \quad [\text{A}] \quad \text{-Le courant dans l'anneau}$$

$$K_{red} = 2 \cdot \sin\left[\frac{\pi \cdot p}{Z_2}\right] \quad \text{-Coefficient de réductions}$$

III.3. calcul de circuit magnétique :

Les circuits magnétique des machines à courant alternatif, les machines asynchrone en particulier doit canaliser les lignes du forces de 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 la réactance magnétique par la suite. Le principe de calcul est basé sur la loi générale de circulation de champ magnétique.

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

Ou :

H_x : représente l'intensité de champ magnétique correspondant à l'induction dans la partie x.

l_x : représente la ligne moyenne de la tranche choisi.

Le calcule de champ magnétique da la machine asynchrone est partagé en cinq parties distinctes :

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

1-La force magnétomotrice dans l'entrefer :

La force magnétomotrice dans l'entrefer est proportionnelle à l'induction dans celui-ci, elle est donner par l'expression suivante :

$$F_d = 0.8 \cdot K_d \cdot B_d \cdot 10^3 \quad [A]. \quad (III-49)$$

K_d : coefficient de CARTER qui tient compte de nom uniformité de l'entrefer, due aux ouvertures des encoches statoriques et rotoriques, il est donner par l'expression suivante :

$$K_d = K_{d1} \cdot K_{d2} \quad [A].$$

$K_{d1} = 1 + \frac{K_{d1}}{t_1 - b_{f1}}$ -coefficient qui prend en considération l'existence des encoches du stator.

$K_{d2}=1$ parce que l'encoche rotorique est de type ovale fermé.

Avec :

b_{f1} -largeur de la fonte rotorique en [mm].

2- Circuit magnétique statorique :

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

a. Longueur moyennes des lignes de champs magnétique dans la culasse statorique :

Elle est donnée par l'expression :

$$L_{c1} = \frac{\pi}{2.p} \cdot (D_{1ext} - h_{c1}) \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-50})$$

b. La force magnétomotrice de la culasse statorique

Elle est donnée par :

$$F_{c1} = H_{c1} \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (\text{III-51})$$

Avec :

H_{c1} : l'intensité de champ magnétique dans la culasse statorique qui correspond à l'induction B_{c1} .

$$B_{c1} = 0,5 \cdot \frac{\alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot B_d}{K_{fer} \cdot h_{c1}} \quad [\text{T}]$$

H_{c1} : est déterminé de la courbe $H_{c1} = f(B_{c1})$. Représente dans *le tableau III.3 (voir l'annexe)*.

c. Force magnétomotrice dans la dent du stator :

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{c1} = H_{z1} \cdot h_{z1} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (\text{III-52})$$

Où :

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

H_{z1} : l'intensité de champ magnétique qui correspond à l'induction B_{z1} .

$$B_{z1 \max} = \frac{t_1 \cdot d}{K_{fer} \cdot b_{z1}} \quad [\text{T}]$$

Représente dans *le tableau III.4 (voir l'annexe)*.

3- circuit magnétique rotorique :

a. Longueur moyennes des lignes du champ magnétique dans la culasse rotorique :

Elle est exprimé par :

$$L_{c2} = \frac{\pi}{2 \cdot p} \cdot (D_{2ext} - 2 \cdot h_{z2} - h_{c2}) + h_{c2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-53})$$

H_{z2} : hauteur de la dent rotorique en [mm].

h_{z1} : hauteur de la culasse rotorique en [mm].

b. La force magnétomotrice de la culasse rotorique

Elle est donnée par :

$$F_{c2} = H_{c2} \cdot L_{c2} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (\text{III-54})$$

Avec :

H_{c2} : l'intensité de champ magnétique dans la culasse rotorique qui correspond à l'induction B_{c2} .

$$B_{c2} = 0,5 \cdot \frac{\alpha_i \cdot \tau_{p2} \cdot B_d}{K_{fer} \cdot h_{c2}} \quad [\text{T}]$$

H_{c2} : est déterminé de la courbe $H_{c2} = f(B_{c2})$. Représente dans *le tableau III.3 (voir l'annexe)*.

a- **Force magnétomotrice dans la dent du stator :**

Pour le type d'encoche choisi on a la relation suivante :

$$F_{c2} = H_{z2} \cdot (h_{z2} - 0,4 \cdot d_2) \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (III-55)$$

Où :

h_{z1} : hauteur de la dent rotorique en [mm].

H_{z2} : l'intensité de champ magnétique qui correspond à l'induction B_{z2} .

$$B_{z2max} = \frac{t_2 \cdot d}{K_{fer} \cdot b_{z2}} \quad [T]$$

Représente dans *le tableau III.4 (voir l'annexe)*.

4-La Force magnétomotrice totale :

$$F_T = \sum F_i = 2 \cdot (F_d + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2} \quad [A] \quad (III-56)$$

Les dents statorique , rotorique et l'entrefer sont parcouru deux fois par les lignes de champ magnétique et pour cela qu'on a met le numéro 2.

5-coefficient de saturation :

a) **coefficient de saturation des dents :**

$$K_{\mu z} = \frac{F_d + F_{z1} + F_{z2}}{F_d}$$

b) **coefficient de saturation des dents :**

$$K_{\mu} = \frac{\sum F_i}{F_d \cdot 2}$$

6-courant magnétisant :

Il représente la composant réactive de courant à vide, il est donné par :

$$I_m = \frac{P \cdot \sum F_i}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad [A] \quad (III-57)$$

7-réactance de magnétisation :

$$X_m = \frac{K_e \cdot U_n}{I_m} \quad [\Omega] \quad \text{(III-58)}$$

K_e : Facteur de majoration de la f.m.m, il varie entre 0.9 et 0.98.

8-Coefficient de dispersion magnétique du stator :

Il est donné par la relation suivante :

$$D_u = \frac{X_1}{X_m}$$

X_1 : réactance inductive de dispersion de l'enroulement statorique

9-force électromotrice à vide E_0 :

Il est donné par la relation suivante :

$$E_0 = \frac{U_n}{1+D_u} \quad [V] \quad \text{(III-58)}$$

III.4. Calcul des paramètres électriques des enroulements :

Pour déterminer les caractéristiques de la machine, on doit calculer tous les paramètres électriques (R_1 , R_2 , X_1 , X_2 , R_{2dem} , X_{2dem}).

III.4.1. paramètre statorique :

a- La résistance d'une phase statorique :

$$R_1 = \frac{r_{au} \cdot L_{w1} \cdot W_1 \cdot 10^3}{a_1 \cdot N_{el} \cdot S_{eff}} \quad [\Omega] \quad \text{(III-59)}$$

Avec :

r_{au} : la résistance du cuivre à la température 115°.

$L_{w1} = 2 \cdot (l_i + L_f l)$ [mm] -La longueur moyenne d'une spire

On a :

$l_{fl} = (1,16 + 0,14 \cdot p) \cdot b_{1moy} + 15$ -La longueur moyenne de la partie frontale d'une demi-spire.

$b_{1moy} = \frac{\pi \cdot D_{1int} + h_{z1}}{Z_1} \cdot y_{1moy}$ -La longueur moyenne d'une section.

y_{1moy} : Le pas moyen de l'enroulement statorique.

b- Réactance de fuite d'encoche :

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

$$X_{enc1} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot l_i \cdot W_1^2}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \cdot l_{enc1} \quad [\Omega] \quad \text{(III-60)}$$

Avec :

$$L_{enc1} = \frac{h_{enc1}}{3 \cdot b_{enc12}} \cdot K_{b1} + \left[\frac{h_1}{b_{en1}} + \frac{3 \cdot h_{k1}}{b_{f1}} + \frac{b_{f1}}{b_{enm1}} \right] \cdot K_{b2} \quad \text{-Coefficient de perméance de l'encoche}$$

On a : K_{b1}, K_{b2} Coefficient donnés par la figure (III.3)

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

c- Réactance de fuite différentielle :

C'est la somme des flux suivants :

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

Elle est donnée par :

$$X_{ld} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot l_i \cdot W_1^2}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \cdot l_{d1} \quad [\Omega] \quad \text{(III-61)}$$

l_{d1} : perméance différentielle à la réactance de fuite différentielle.

Elle est donnée par :

$$l_{d1} = \frac{0,9 \cdot t_1 \cdot (q_1 \cdot K_{en1})^2}{d \cdot K_d} \cdot K_{rr1} \cdot K_{dd1} \cdot K_{f1}$$

$$K_{f1} = 1 - \frac{0,033 \cdot b_{f1}^2}{d \cdot t_1}$$

Ou :

K_{rr1} : Coefficient qui dépend de Q1 donné par le tableau III.5 (voir annexe)

K_{dd1} : Coefficient de fuite différentielle donné par **le tableau T.6 (voir annexe)**, il est donné en fonction de Z_2/P et q_1 .

d- 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 l'expression suivante :

$$X_{If} = \frac{1.58 \cdot f_1 \cdot l_i \cdot W_1^2}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \cdot l_{f1} \quad \text{(III-62)}$$

l_{f1} : perméance frontale proportionnelle à la réactance de fuite frontale.

Elle est donnée par la relation suivante :

$$l_{f1} = 0,34 \cdot \frac{q_1 \cdot (l_{1f} - 1,64 \cdot \beta \cdot \tau_{p1})}{l_i}$$

La réactance de fuite globale du stator est donnée comme suit :

$$X_I = \frac{1.58 \cdot f_1 \cdot l_i \cdot W_1^2}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \cdot l_{enc1} + l_{d1} + l_{f1} \quad [\Omega]$$

$l_I = l_{enc1} + l_{d1} + l_{f1}$ - perméance de dispersion de l'enroulement statorique,

III.4.2. paramètre rotorique :

III-4-2-1-résistance rotorique :

a- Résistance active de la barre :

Pour ce type d'encoche présenté dans la figure (III.2) on a :

$$R_b = \rho_{al(T)} \cdot \frac{l_t}{S_b} \cdot 10^3 \quad [\Omega] \quad \text{(III-63)}$$

Pour : $T=20^\circ c$ $\rho_{al(T)} = 28 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega.m]$

$T=20^\circ c$ $\rho_{al(T)} = 48,8 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega.m]$

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

Avec :

$$S_b = 0,125. \pi. (d_{em}^2 + d_2^2) + 0,5. h_2. (d_{2m} + d_2) \quad [mm^2]\text{-section de la barre.}$$

a- Résistance de l'anneau :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{an} = \frac{\rho_{al(T)}.2.\pi.D_{an}.10^3}{Z_2.S_{an}} \quad [\Omega] \quad (III-64)$$

Avec :

$$S_{an} = \frac{0,35.Z_2.S_b}{2.p} \quad [mm^2] \quad \text{-Section de l'anneau}$$

$$h_{an} = 1,13. h_{z2} \quad [mm] \quad \text{-Hauteur de l'anneau.}$$

$$D_{an} = D_{2ext} - h_{an} \quad [mm] \quad \text{-Diamètre moyen de l'anneau.}$$

b- Résistance de l'anneau ramené vers la barre :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{anb} = \frac{R_{an}}{K_{red}^2} \quad [\Omega] \quad (III-65)$$

Avec :

$$K_{red} = 2. \sin \frac{\pi.p}{Z_2} \quad \text{-Coefficient de réduction de l'anneau vers la barre.}$$

c- Résistance de l'anneau ramené au stator :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{an2} = M. R_{anb} \quad [\Omega] \quad (III-66)$$

Avec :

$$M = \frac{4.m_1}{Z_1} \cdot \left(\frac{W_1 \cdot K_{enr1}}{K_{ob}} \right)^2 \quad \text{-Coefficient de réduction de la cage rotorique vers le stator.}$$

$$K_{ob} = \frac{\sin\left(\frac{\alpha_{ob}}{2}\right)}{\left(\frac{\alpha_{ob}}{2}\right)} \quad \text{-Coefficient d'obliquité des encoches rotorique}$$

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

b- Résistance active d'une phase rotorique :

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

$$R_2 = R_b + R_{an2} \quad [\Omega] \quad (III-67)$$

c- Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator :

Pour notre type d'encoche est donnée comme suit :

$$R_{ph2} = M \cdot R_2 \quad (III-68)$$

III-4-2-2-réactance de dispersion et perméance du rotor :

Dans cette partie, nous allons effectuer le calcul de :

a- La réactance de fuite globale :

Due au flux de fuite qui se renferme autour des conducteurs, est donné par l'expression suivante :

$$X_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_i \cdot 10^{-9} \cdot (l_{enc2} + l_{d2} + l_{ob} + l_{f2}) \quad [\Omega] \quad (III-69)$$

Avec :

l_{enc2} , l_{d2} , l_{ob} , l_{f2} : sont respectivement les perméances : d'encoche, différentielle, oblique et frontale.

On procède au calcul des différentes perméance :

• Perméance d'encoche :

$$l_{enc2} = Cl + \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \quad (III-70)$$

Avec :

$$Cl = \Psi \cdot \left[\left(\frac{(h_{enc2} + 0,4 \cdot d_2)}{3 \cdot d_{2m}} \right) \cdot \left(\frac{(1 - \pi \cdot d_2)}{8 \cdot S_b} \right)^2 + 0,66 - \left(\frac{b_{f2}}{2 \cdot d_{2m}} \right) \right]$$

Ψ : Représenté par la figure (III-4)

Pour le régime nominal on a $\Psi = 1$

• **Perméance différentielle :**

Donné par la relation suivante :

$$l_{d2} = \frac{t_2}{12 \cdot e \cdot K_d} \quad (\text{III-71})$$

• **Perméance frontale :**

$$l_{f2} = \frac{2,3 \cdot D_{an}}{l_i \cdot Z_2 \cdot (e)^2} \log \left(\frac{4,7 \cdot D_{an}}{2 \cdot (h_{an} + b_{an})} \right) \quad (\text{III-72})$$

Avec :

$$b_{an} = \frac{S_{an}}{h_{an}} \quad [mm] \quad \text{-la largeur de l'anneau.}$$

• **Perméance oblique :**

$$l_{ob} = \frac{t_2 \cdot B_{ob}^2}{9,5 \cdot e \cdot K_d \cdot K_u} \quad (\text{III-73})$$

Avec :

$$K_u = \frac{F_T}{2 \cdot K_d} \quad \text{-Coefficient de saturation de la machine}$$

$$B_{ob} = \frac{t_1}{t_2}$$

b- Réactance de fuite de rotor ramené au stator :

Pour ce type d'encoche choisis on a :

$$X_{2s} = M \cdot X_2 \quad [\Omega] \quad (\text{III-74})$$

III-4-3-paramètres au démarrage :

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

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

a- Profondeur de pénétration :

Elle est donnée par :

$$h_{pp} = \frac{h_{enc2}}{1+\phi} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-75})$$

ϕ : Coefficient qui dépend de la valeur de ζ , il est donné par la courbe de la figure (III.4)

$$\zeta = 0,064 \cdot h_{enc2} \cdot \sqrt{g} \quad \text{Pour } T=115^\circ\text{C}$$

b- Longueur à la limite de pénétration :

Elle est donnée par :

$$b_{pp} = d_2 - \left[\left(\frac{d_2 - d_{2m}}{h_2} \right) \cdot \left(\frac{h_{pp} - d_2}{2} \right) \right] \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-76})$$

c- Section de la barre par le courant de démarrage :

Elle est donnée par :

$$S_{bdem} = \left(\pi \cdot \left(\frac{d_2^2}{8} \right) \right) + [0,5 \cdot (d_2 + b_{pp}) \cdot (h_{pp} - 0,5 \cdot d_2)] \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III-77})$$

d- Résistance de la barre au démarrage :

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

$$R_{bdem} = R_b \cdot K_{dep} \quad [\Omega] \quad (\text{III-78})$$

$$K_{dep} = \frac{S_b}{S_{bdem}} \quad \text{-Coefficient de déplacement de courant, c'est le rapport entre la section de la}$$

barre et la section de la barre au démarrage.

a- Résistance de la cage au démarrage :

Elle est donné par :

$$R_{2dem} = R_{anb} + R_{bdem} \quad [\Omega] \quad (III-79)$$

e- Résistance de la cage au démarrage ramené au stator :

Elle est donné par :

$$R_{2dem-ram_s} = M. (R_{anb} + R_{bdem}) \quad [\Omega] \quad (III-80)$$

b- Réactance de fuite au démarrage :

Pour le type d'encoche choisis :

$$X_{2dem} = 7,9. f_1. l_i. l_{2dem}. 10^{-9}. \quad [\Omega] \quad (III-81)$$

$$l_{2dem} = l_{2encdem} + l_{2d} + l_{2f} + l_{ob}$$

-Réactance de dispersion de rotor au démarrage seule la perméance d'encoche qui est affectée par l'effet de refoulement du courant.

c- Réactance de fuite au démarrage ramené au stator :

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

Pour le type d'encoche choisis :

$$X_{2dem-ram_s} = M. X_{bdem} \quad [\Omega] \quad (III-82)$$

III.5. Calcul des pertes et du rendement :

La transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique s'accompagne certainement 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 consacré à l'évaluation des pertes dans le moteur asynchrone, et cela pour permettre d'estimer le rendement 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 électrique dans le cuivre et l'aluminium.
- Pertes mécaniques.
- Pertes supplémentaire.

III-5-1- pertes principale dans le fer :

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

a) Pertes dans les dents :

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

$$P_{fz1} = 1,7 \cdot p_{10} \cdot B_{z1max} \cdot G_{z1} \quad [W] \quad (III-83)$$

$$P_{10} = 2,5 [W.Hg^{-1}] \quad \text{pour l'acier 2013}$$

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

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 :

$$P_{c1} = 1,7 \cdot p_{10} \cdot B_{c1} \cdot G_{c1} \quad [W] \quad (III-84)$$

$$G_{c1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot l_i \cdot K_{fer} \cdot h_{c1} \cdot \pi \cdot (D_{1ext} + h_{v1}) \quad [Kg]$$

G_{c1} : poids des dents statorique.

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

$$P_{fer} = P_{fz1} + P_{c1} \quad [W]$$

III-5-2- Pertes électrique dans le cuivre et dans l'aluminium :

C'est les pertes par effet joules dans les enroulements du moteur

a) Perte joules statorique :

Ce sont les pertes dans le cuivre, elles sont exprimée par :

$$P_{jl} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_{n1}^2 \quad [\text{W}] \quad (\text{III-85})$$

Avec :

m_1 : Nombre de phase statorique.

R_1 : Résistance d'une phase statorique.

I_{n1} : Courant dans une phase statorique.

b) Pertes joules rotorique :

Ce sont les pertes dans l'aluminium, elles sont exprimée par :

$$P_{jl} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad [\text{W}] \quad (\text{III-86})$$

Avec :

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

I_{n1} : Courant dans la barre.

III-5-3- Pertes mécanique :

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

$$p_{mec} = K_t \cdot (N \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_{1ext} \cdot 10^{-2})^4 \quad [\text{W}] \quad (\text{III-87})$$

Avec :

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

$$K_t = 1 \quad \text{Pour } 2p > 2.$$

III-5-4- Pertes supplémentaires :

Ces pertes 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 :

$$P_{\text{sup}} = 0,005 \cdot \frac{P_n \cdot 10^3}{h_n} \quad [\text{W}] \quad (\text{III-86})$$

III-5-5- Pertes totales

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_t = P_{\text{fer}} + P_{j1} + P_{j2} + P_{\text{mec}} + P_{\text{sup}} \quad [\text{W}] \quad (\text{III-87})$$

III-5-6- Le rendement de la machine :

Le rendement est donné par la relation suivante :

$$h_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{P_n \cdot 10^3 + P_t} \quad (\text{III-88})$$

III-5-7- Calcul de la résistance de magnétisation :

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

$$I_{oa} = \frac{P_{\text{fer}} + P_{\text{mec}} + P_{a10}}{m_1 \cdot U_{n1}} = \frac{P_{\text{fer}} + P_{\text{mec}} + R_1 \cdot (I_\mu)^2}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad [\text{A}] \quad (\text{III-89})$$

D'où :

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

Avec :

I_μ : Courant magnétisant.

X_m : Réactance magnétisante exprimée en $[\Omega]$.

III.6. Calcul des performances du moteur :

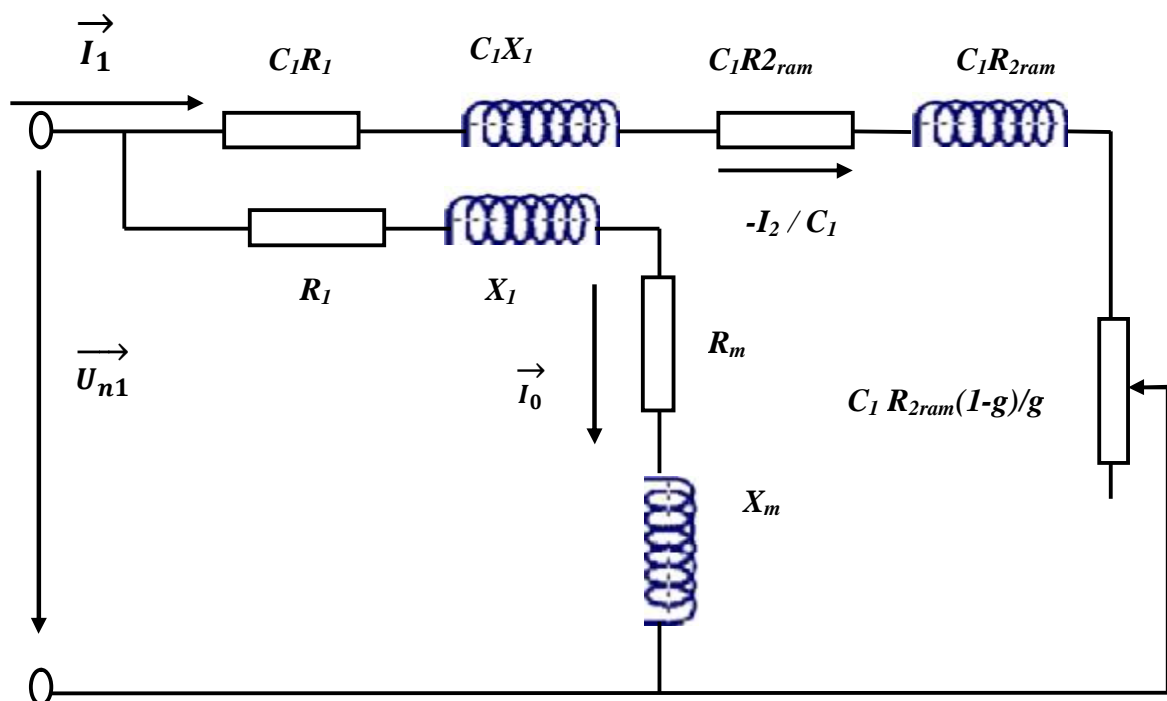
Dans cette partie de calcul, nous étudions les performances des moteurs, en utilisant une méthode analytique basée les schémas équivalents de la machine asynchrone. Il existe plusieurs schémas équivalents de la machine asynchrone qui sont analogue à celui s'un transformateur.

- * Schéma physique équivalent ramené au rotor immobile.
- * Schéma d'une machine asynchrone considéré comme un transformateur (schéma équivalent en T).
- * Schéma d'une machine asynchrone avec circuit magnétisant rapport é aux bornes du réseau (schéma équivalent en L)

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

III-6-1- le schéma équivalent en L du moteur :

C'est un schéma conventionnel monophasé ramené au stator :



FigIII.2:schéma 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 ramené au stator en $[\Omega]$.

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

R_m : Résistance magnétique en $[\Omega]$.

X_m : Réactance magnétique en $[\Omega]$.

$C_1 \approx 1 + \frac{X_1}{X_m}$ -Constant de transformation du schéma en T vers le schéma en L.

III-6-2-caractéristique de fonctionnement du moteur :

En se référant à la figure (IV-1), on détermine :

a- Le :

$$g = \frac{A - \sqrt{A^2 - C_1^2 \cdot R_{2ram} \cdot B}}{B} \quad (III-90)$$

Avec

$$B = 2A + R'$$

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

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

b- Puissance rapportée de cycle primaire au cycle secondaire :

La puissance rapportée de cycle primaire au cycle secondaire est égale à :

$$P'_2 = P_2 + P_{sup} + P_{mec} \quad [W] \quad (III-91)$$

c- Inductance équivalente :

Elle est exprimé par :

$$Z_{2eq} = \sqrt{R_{2eq}^2 + X_{2eq}^2} \quad [\Omega] \quad (III-92)$$

Avec :

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

$$X_{2eq} = C_1 R_1 + C_1^2 \cdot X_{2ram} \quad [\Omega]$$

d- Calcul de courant secondaire :

Le courant dans le circuit secondaire est donné par :

$$I_2'' = \frac{U_{n1}}{Z_{2eq}} \quad [A] \quad (III-93)$$

$$I_2' = C_1 I_2'' \quad [A]$$

Avec :

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

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

e- Facteur de puissance :

Le facteur de puissance rotorique est donné par :

$$\cos \phi_2 = \frac{R_{2eq}}{Z_{2eq}} \quad (III-94)$$

D'où

- **Le courant actif :**

$$I_{2a}'' = I_2'' \cdot \cos \phi_2 \quad [A] \quad (III-95)$$

- **Le courant réactif :**

$$I''_{2r} = I''_2 \cdot \sin \phi_2 \quad [\text{A}] \quad (\text{III-96})$$

- Le courant actif qui correspond ai pertes fer et aux pertes joules statorique à vide

$$I_{0a} = \frac{P_{fer} + P_{mec} + P_{a10}}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad [\text{A}] \quad (\text{III-97})$$

$$P_{a10} = m_1 \cdot R_l \cdot I_\mu^2$$

- **Le courant magnétisant :**

$$I_{or} = \frac{P \cdot \sum F_i}{0,9 \cdot W_1 \cdot m_1 \cdot K_{enc1}} \quad [\text{A}] \quad (\text{III-98})$$

- **Le courant total à vide :**

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \quad [\text{A}] \quad (\text{III-99})$$

- **Le courant absorbé:**

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} \quad [\text{A}] \quad (\text{III-100})$$

Avec :

$$I_{1a} = I_{0a} + I''_{2a}$$

$$I_{1r} = I_{0r} + I''_{2r}$$

Le facteur de puissance rotorique est donné par :

$$\cos \phi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1} \quad (\text{III-101})$$

f- La puissance absorbée par le moteur :

Elle est exprimée par :

$$P_1 = m_1 \cdot U_{n1} \cdot I_{1a} \quad [\text{W}] \quad (\text{III-102})$$

g- Vitesse de rotor du moteur :

Exprimé par :

$$N_2 = N \cdot (1 - g) \quad [\text{Tr/min}] \quad (\text{III-103})$$

Avec :

N : Vitesse de synchronisme.

g : Le glissement

$\frac{N_2}{N} = 1 - g$ C'est la vitesse relative de rotor par rapport au stator.

h- Couple utile sur l'arbre du moteur :

Il est donné par :

$$C_u = 9,55 \cdot \frac{P_2 \cdot 10^3}{P_n} \quad [N.m] \quad (\text{III-104})$$

III-5-3- Caractéristiques de démarrage et capacité de surcharge :

a- Résistance équivalente au démarrage :

Elle est exprimée comme suit :

$$R_{eqdem} = C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot R_{2dem-ram} \quad [\Omega] \quad (\text{III-105})$$

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

b- Réactance équivalente au démarrage :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$X_{eqdem} = K_x \cdot X_{var} + X_{const} \quad [\Omega] \quad (\text{III-106})$$

Avec :

K_x : Coefficient qui est donné suivant la forme d'encoche.

Ø Les encoches semi ouvert : $K_x = 0,0825$

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_{var} et X_{const} sont respectivement données par les relations suivantes :

$$X_{const} = C_1 \cdot X_1 \cdot \frac{l_1 - l_{1dem}}{l_1} + C_1^2 \cdot X_{1dem-ram} \cdot \frac{l_2 - l_{2var}}{l_{2var}} \quad [\Omega]$$

$$X_{var} = C_1 \cdot X_1 \cdot \frac{l_{1dem}}{l_1} + \frac{C_1^2 \cdot X_{1dem-ram} \cdot l_{2var}}{l_2} \quad [\Omega]$$

Avec :

l_{2var} : Composante variable de perméance rotorique, elle est donnée par :

$$l_{2var} = l_{enc2 var} + l_{2d}$$

Ou :

$l_{enc2 var}$: Composante variable de perméance d'encoche rotorique.

Pour le type d'encoche rotorique choisis on a :

$$l_{enc2 var} = 0$$

Avec :

l_1 : perméance statorique.

l_{1dem} : perméance statorique au démarrage.

Elle est donnée par :

$$l_{enc1d} = \left(\frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot K_{\beta 2}$$

a- Capacité de surcharge :

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

$$K = \frac{C_{max}}{C_{nom}} = \frac{\frac{g_{nom}}{g_{cr}} + \frac{g_{cr}}{g_{nom}} + R_{cr}}{2 + R_{cr}} \quad (\text{III-107})$$

Avec :

$$R_{cr} = 2 \cdot R \cdot \frac{g_{cr}}{(R_{2ram} \cdot C_1)} \quad - \text{Résistance critique en } [\Omega]. \quad (\text{III-108})$$

G_{nom} : nominal

$$g_{cr} = \frac{C_1 \cdot R_{2ram}}{(X_2 + X_{2ram} \cdot C_1)} \quad \text{- critique.} \quad \text{(III-109)}$$

R_{2ram} : Résistance rotorique ramené.

X_{2ram} : Réacstance rotorique ramené.

c- Courant au 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 atteindra 6 à 7 fois le courant nominal. Sa valeur est donnée par l'expression suivante :

$$I_{1dem} = \frac{u_{n1}}{\sqrt{R_{eqdem}^2 + X_{eqdem}^2}} \quad \text{[A]} \quad \text{(III-110)}$$

U_{n1} : Tension d'alimentation.

d- Le couple de démarrage :

Il est donné par l'expression suivante :

$$C_d = \frac{p \cdot m_1 \cdot R_{2dem} \cdot U_{n1}^2}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot (R_{eqdem}^2 + X_{eqdem}^2)} = p \cdot m_1 \cdot I_{1dem}^2 \cdot \frac{R_{2dem}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} \quad \text{[N.m]} \quad \text{(III-111)}$$

N.B :

Le rapport entre le couple de démarrage et le couple nominal est estimé a :

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

$$\frac{C_d}{C_{nom}} = 2 \div 2,2$$

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

$$\frac{C_d}{C_{nom}} = 1,2 \div 1,4$$

III.7. Résultats obtenu avec Matlab :

Résultats de dimensionnement de rotor et du stator avec Matlab :

On résume les résultats de calcul dans les tableaux suivants :

V.1. Tableau de résultats de dimensionnement de stator :

STATOR			
<i>désignations</i>	<i>Symbole</i>	<i>Valeur</i>	<i>Unité</i>
Diamètre extérieur	Dext1	200	mm
Diamètre intérieur	Dint1	131	mm
Le diamètre moyen de stator	D1moy	165	mm
La longueur virtuelle de l'induit	Li	128.3402	mm
Section effective d'un conducteur	Seff	0.78	mm ²
Pas polaire	τ	157.07	mm
Nombre d'encoche	Z1	36	encoches
Largeur maximale de l'encoche	benm1	9.04	mm
Largeur minimale de l'encoche	benm2	6.17	mm
La hauteur de la dent	hz1	18.29	mm
Hauteur de la calvette	hk1	2.5	mm
Largeur des dents du stator	bz1	5.7	mm
La hauteur de dos statorique	hc1	32.4	mm
Nombres de conducteurs en série	N	483	conducteurs
Nombres de conducteurs par encoche	Uen1	47	conducteurs
Nombre de spires par phase	W1	140.7004	spires
Surface nette de chaque encoche	Sen1	55.66	mm ²
Pas dentaire	t1	11.43	mm
Coefficient de remplissage des encoches	Krem	0.7054	
Courant simple par phase	I1	6.4192	A
Flux utile par pôle	ϕ	0.0069	web
Flux totale	ϕt	0.0685	web

V.2. Tableau de résultats de dimensionnement de rotor avec Matlab :

ROTOR			
<i>désignations</i>	<i>Symbole</i>	<i>Valeur</i>	<i>Unité</i>
Diamètre extérieur	D2ext	130	mm
Diamètre intérieur	D2int	41.66	mm
Section effective d'un conducteur	Seff	0.78	mm ²
Pas polaire	τ	157.07	mm
Nombre d'encoche	Z2	28	encoches
Largeur maximale de l'encoche	ben2	10.03	mm
Largeur minimale de l'encoche	benm2	7.6	mm
La hauteur de la dent	hz2	11.8	mm
Largeur des dents du rotor	bz2	7.32	mm
La hauteur de la culasse rotorique	hc2	32.4	mm
Le rayon de la tête extérieur de l'encoche	r1	2.07	mm
Le rayon de la tête intérieur de l'encoche	r2	3.97	mm
La hauteur utile de l'encoche	henc2	10.87	mm
Surface nette de chaque encoche	Sen2	233.5	mm ²
Pas dentaire	t2	14.6	mm
Courant simple par phase	I2	148.0584A	A
Densité de courant	J2	0.69	a/mm ²

Les deux tableaux représentent les résultats récapitulatifs de calcul des dimensions géométrique ainsi que contraintes électromagnétiques du stator et du rotor par le logiciel Matlab.

V.3. Tableau des résultats des contraintes électromagnétiques du moteur obtenus par MATLAB :

<i>Les contraintes électromagnétiques</i>			
<i>désignations</i>	<i>Symbole</i>	<i>Valeur</i>	<i>Unité</i>
La f.m.m dans la culasse du stator	Fc1	26.85	A
La f.m.m dans la dent du stator	Fz1	82.15	A
La f.m.m dans la culasse du stator	Fc1	26.85	A
La f.m.m dans l'entrefer	Fd	405.5	A
La f.m.m dans la culasse du rotor	Fc2	28.61	A
La f.m.m dans la dent du rotor	Fz2	28.66	A
La f.m.m total	FT	1.0922e+003	A
Le courant magnétisant	Im	6.36	A
Les pertes électriques statorique	Pe11	20	W
Les pertes électriques rotorique	Pe12	109.75	W
Les pertes mécaniques	Pmec	36	W
Les pertes magnétiques dans la culasse statorique	Pmec1	277	W
Les pertes magnétiques dans les dents statorique	Pmz1	186.77	W
Les pertes magnétiques principales	Pm	464	W
Les pertes supplémentaires	Psup	32.7	W
Les pertes totales	Psom	667.08	W
La puissance absorbée par le moteur	P1	6167.3	W
Le rendement	Ran	0.89	

Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons cité les différentes équations de base pour dimensionner la feuille statorique et rotorique pour calculer une machine asynchrone triphasée ainsi ces dimensions magnétiques et électriques.

Le prochain chapitre sera consacré à la présentation ainsi qu'à l'utilisation du logiciel SPEED PC-imd pour le dimensionnement d'une machine asynchrone

Chapitre IV

» *Exploitation du logiciel Speed pour le calcul du moteur*

**Cahier de charge**

- Puissance nominal : $P_n = 5,5 \text{ kW}$.
- Facteur de puissance : $\cos\varphi = 0,85$.
- Diamètre extérieur $D_{ext} = 200 \text{ mm}$.
- Diamètre intérieur $D_{int} = 129,96 \text{ mm}$.
- Rendement nominal : $\eta' = 84\%$.
- Tension nominal : $U_n = 380 \text{ V}$.
- Nombre d'encoche : $Z = 36$ encoches.
- Courant nominal : $I_n = 11,7 \text{ A}$.
- Couple nominal : $C_n = 36 \text{ Nm}$.
- Nombre de phase : $m = 3$.
- Nombre de paires de pôle : $2P = 4$.
- Hauteur d'axe : $h = 130 \text{ mm}$.
- Fréquence de courant du l'enroulement : $f = 50 \text{ Hz}$.
- La vitesse de synchronisme : $n = 1500 \text{ tr/mn}$.
- Classe d'isolation : (F).
- Indice de protection : IP54.
- Type d'enroulement : enroulement concentrique à double coches.
- Épaisseur d'isolation pour le stator : est entre $(0,3 \div 0,5)$.
- Épaisseur d'isolation pour le rotor : est entre $(0,3 \div 0,5)$.



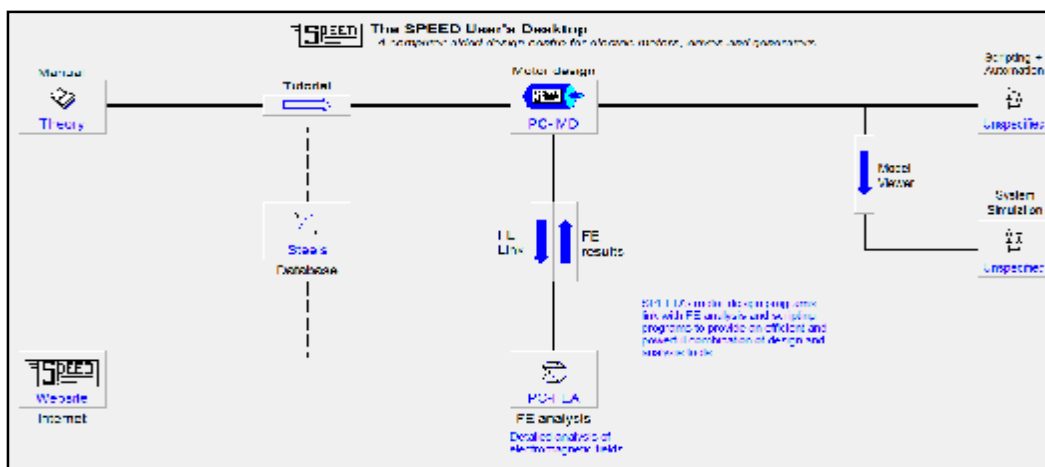


IV. Introduction :

SPEED est l'outil de dimensionnement de moteurs électriques le plus avancé sur le marché, il dispose de nombreux éditeurs permettant à l'utilisateur de définir la géométrie, le bobinage ainsi que la commande de la machine modéliser [1], il lui permet de visualiser les grandeurs caractéristique telles que le couple, la vitesse , les courants et tensions , les pertes, les diagrammes équivalents...

Grâce à une bibliothèque complète (types de moteurs, d'encoches, des barres, schémas de bobinage, commande,...), un moteur peut être facilement et rapidement dimensionné à partir de ses paramètres caractéristique [13].

Actuellement des interfaces d'automations sont fournies dans PM-imd, PC-bdc, PC-srd, PC-dcm, PC-wfc, PC-lpm et à un moindre degré dans les bases de données d'acier et d'aimant. Dans notre étude nous nous intéressons à PC-imd.



IV. 1 : Structure générale de Speed

IV.2 Définition de PC-imd :

PC-imd [13] est destiné à la conception et le calcul de moteurs à induction. Il est basé sur la théorie classique du moteur à induction, avec quelques extensions de cette théorie développé par le Laboratoire SPEED et ces associés. La conception à base de PC-imd est interactive et rapide.



Cependant, PC-imd ne fournit les dimensions optimisées de la machine, par lui-même. PC-imd est conçu comme un outil de calcul plutôt qu'un programme spécialisé.

IV.3. Utilisation de PC-imd

On peut utiliser PC-imd dans les cas suivants :[13]

1. Conception et étude de des performances des machines à induction et leur commande.
2. Conception préliminaire.
3. Effectuer des calculs de conception pour des gammes entières de produits de moteur à induction.

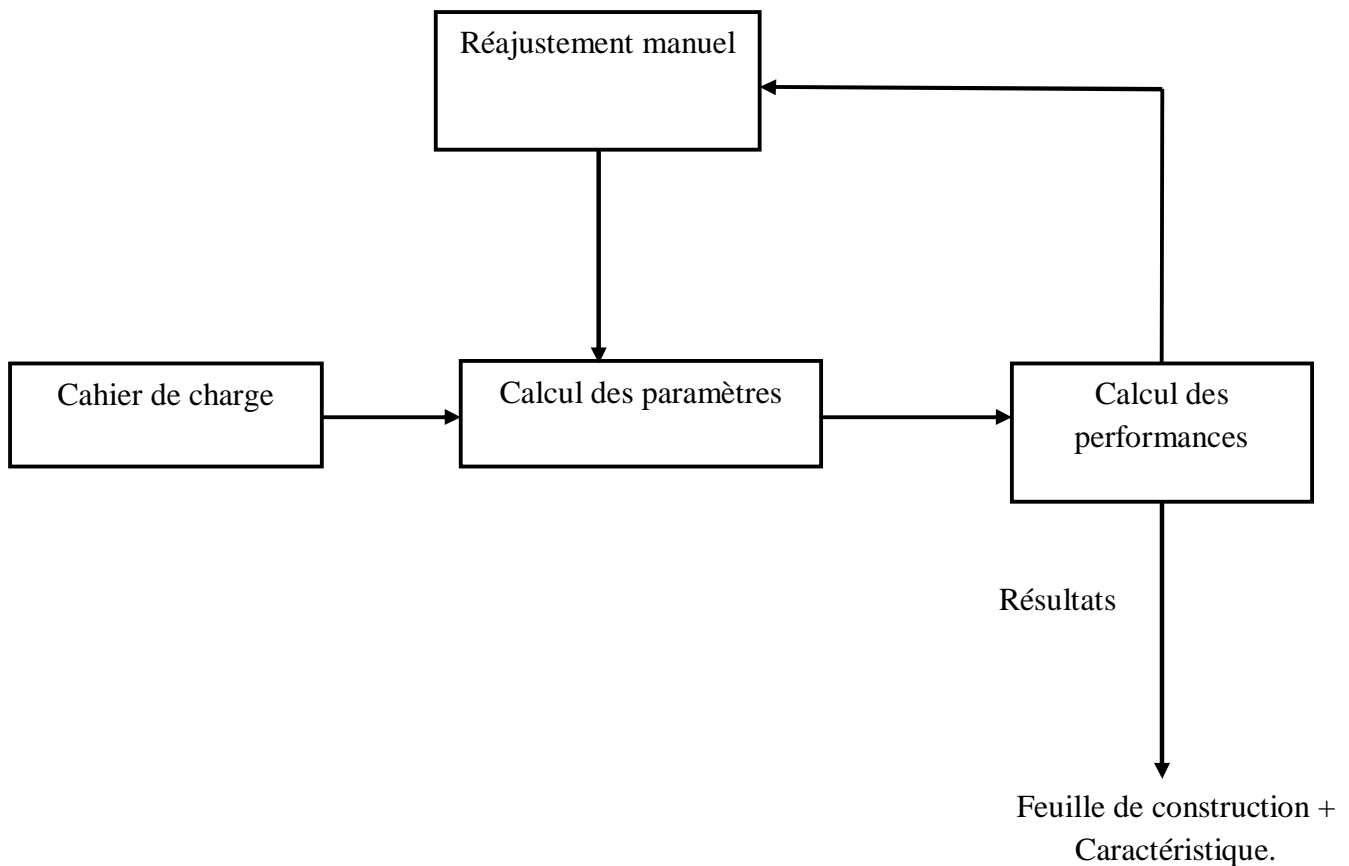


Fig IV.2. Processus de conception en boucle.



IV.4. Les différentes étapes de PC-imd :

IV.4.1. Outline Editor

Cette phase dédiée au dimensionnement géométrique du moteur, en particulier la section transversale et les dimensions axiales. Dans cette partie, nous nous intéressons au dimensionnement des feuilles statorique et rotorique.

IV.4.1.1. Dimensionnement du stator :

Pour dimensionner la feuille statorique, il suffit de cliquer sur n'importe quel paramètre pour introduire sa valeur. Cette dernière est calculée en utilisant la méthode classique, par exemple, pour la largeur de la dent statorique (TW-S), il suffit d'appliquer la formule (III.3) et le rayon extérieur du stator du stator (Rad3).

IV.4.1.2. Dimensionnement du rotor :

Après avoir terminé la partie statorique, on clique sur le « *Rotor only* » pour dimensionner la feuille rotorique, une interface graphique apparaît. On procède de la même manière que pour le stator.

A la fin de des deux étapes, on peut visualiser les deux feuilles statorique et rotorique simultanément, en cliquant sur Full moteur, comme le montre la figure suivante :

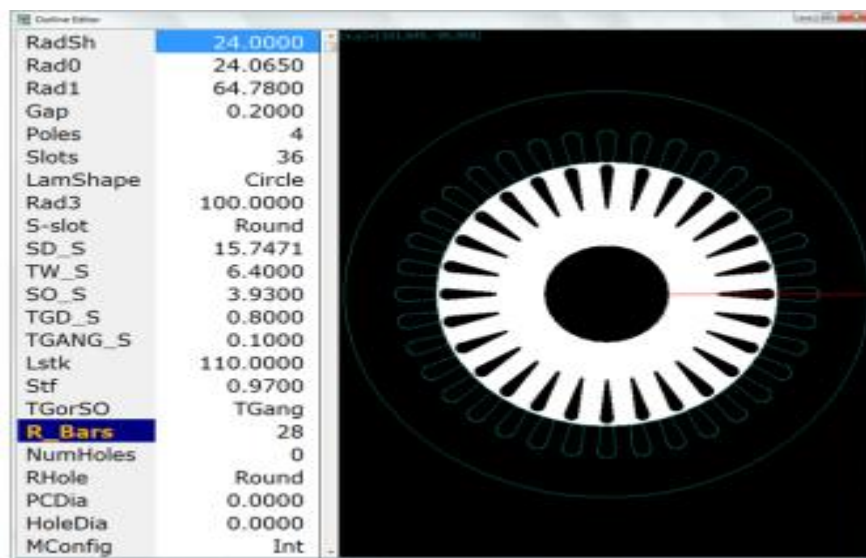


Fig IV.3. Forme géométrique du moteur



IV.2. Template Editor, Ted :

Dans le PC-imd, on a de nombreux paramètres d'entrée, comme l'éditeur plan affiche uniquement les paramètres géométriques (dimension), nous avons besoins alors, d'un éditeur modèle (**Template Editor**) pour afficher les paramètres non géométriques.

Cette étape est composée de plusieurs parties : Mains, Winding, Losses, Thermal, Test data, Simulation et Settings, chaque partie a ses propres paramètres.

Toutefois, on ne peut pas vérifier la validité des paramètres définis jusqu'à ce qu'une analyse complète soit effectuée. Cela est fait dans le module **Analysis**. Dans la figure suivante est illustré le menu principal du Template editor.

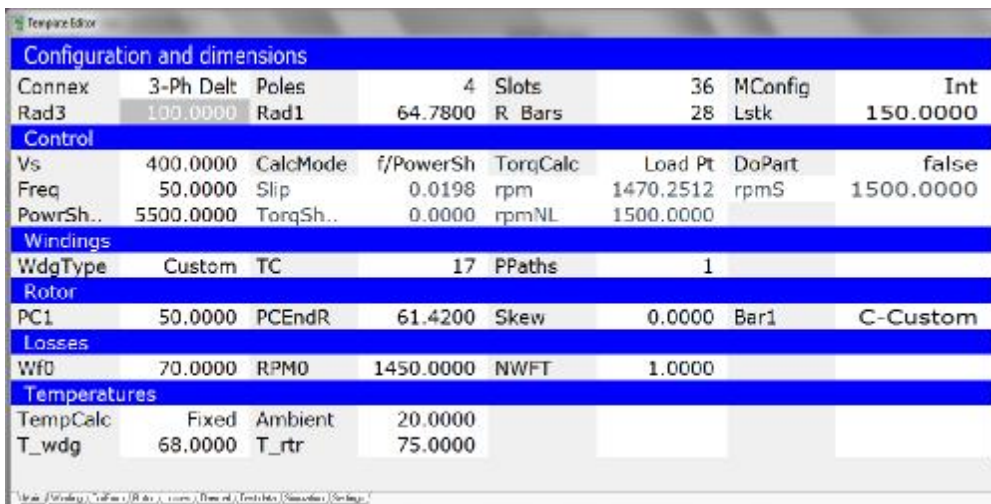


Fig IV.4. Interface principale de Template editor

Cette interface est composée de plusieurs sous-interfaces, on prend quelques exemples :

- Winding paramètres (paramètres d'enroulement) : est donnée par la figure suivante :

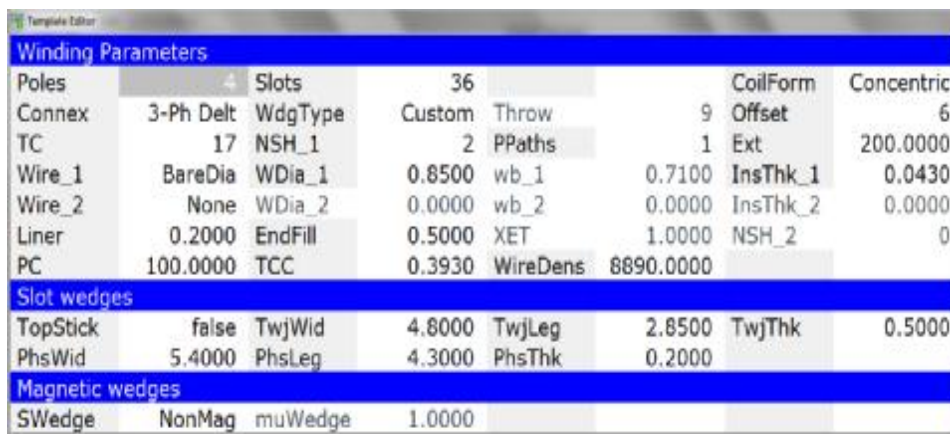


Fig IV.5. Interface de paramètre d'enroulement



- Rotors paramètres : est données par la figure suivante :

Rotor Parameters							
Bar1	C-Custom	R_Bars	28	MConfig	Int		
muPlug	1.0000	SBFULL	true	Db/Cage	false		
Lstk	150.0000	ROH	0.0000	XStf_R	1.0000		
Skew	0.0000	SkewUnits	SSlots	Ecc	0.0400	ShDens	7850.0000
Cage 1							
PC1	50.0000	PCEndR	61.4200	PCN	50.0000	PC2	50.0000
TCC1	0.3750	TCCEndR	0.3750	TCCN	0.3750	TCC2	0.3750
CgDens	2700.0000	ERDens	2700.0000	Shrink	0.0000		
Rotor Fins							
NRFins1	10	RFinL1	23.0000	RFinThk1	3.0000		
NRFins2	10	RFinL2	23.0000	RFinThk2	3.0000		

Fig IV.6. Interface de paramètre du rotor

IV.4.3. Winding Editor :

PC-imd possède un éditeur spécialisé pour la visualisation et la configuration d'un enroulement du stator, cette partie est composé de plusieurs de sous-interface :

ONE PHASE, ALL PHASE, MMF, HARMONICS, WDG FACTORS et GORGE.

- **ONE PHASE** : dans cette partie on détermine le schéma du bobinage d'une seule phase. Il est représenté sur la figure suivante :

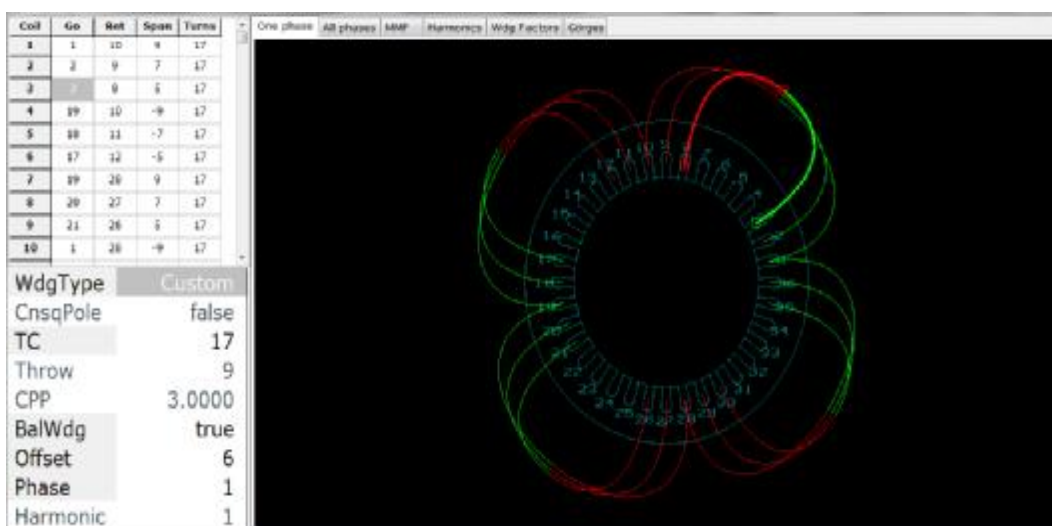


Fig IV.7. Schéma de bobinage d'une phase



- **ALL PHASE** : cette figure représente le schéma du bobinage des trois phases

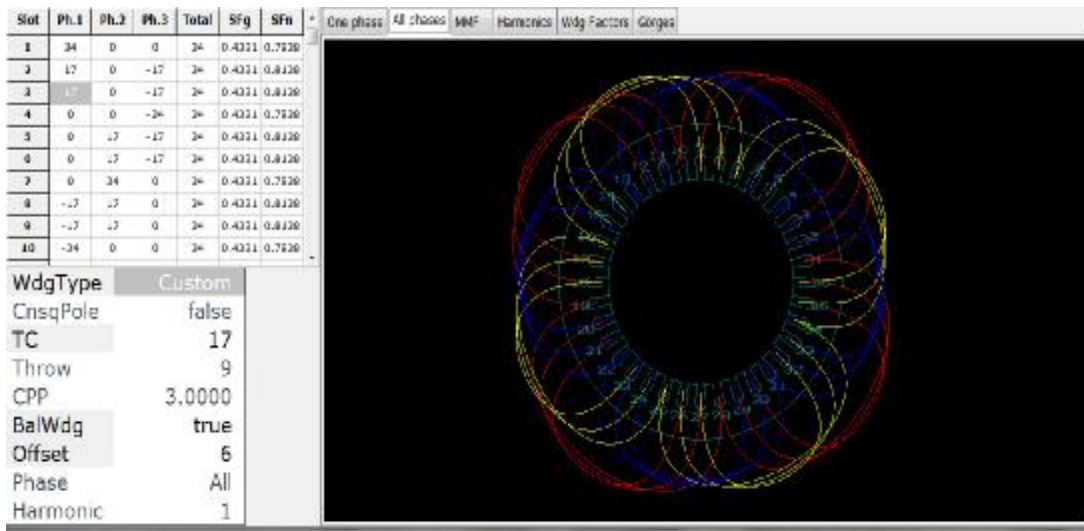


Fig IV.8. Schéma de bobinage des trois phases

- **MMF** : Cette figure montre la force magnétomotrice à travers l'entrefer. Cette dernière est déterminée en considérant que l'acier est infiniment perméable. De plus on suppose que l'enroulement est compensé de courants de filaire.



Fig IV.9. Schéma de la force magnétomotrice



- **HARMONICS** : Dans le menu Harmonic, le contenu harmonique de la fmm est déterminé. Les harmoniques peuvent être déterminés suivant les fréquences électriques ou harmoniques. La figure suivante donne les harmoniques mécaniques :

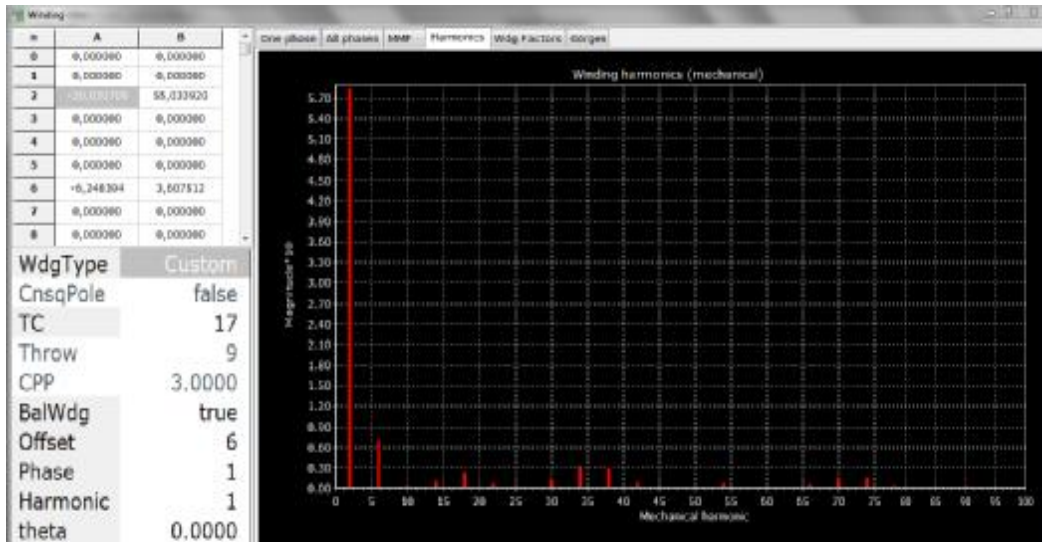


Fig IV.10. Schéma des harmoniques mécanique

- **WDG FACTORS** : les facteurs d'enroulement sont donnés en fonction des harmoniques.

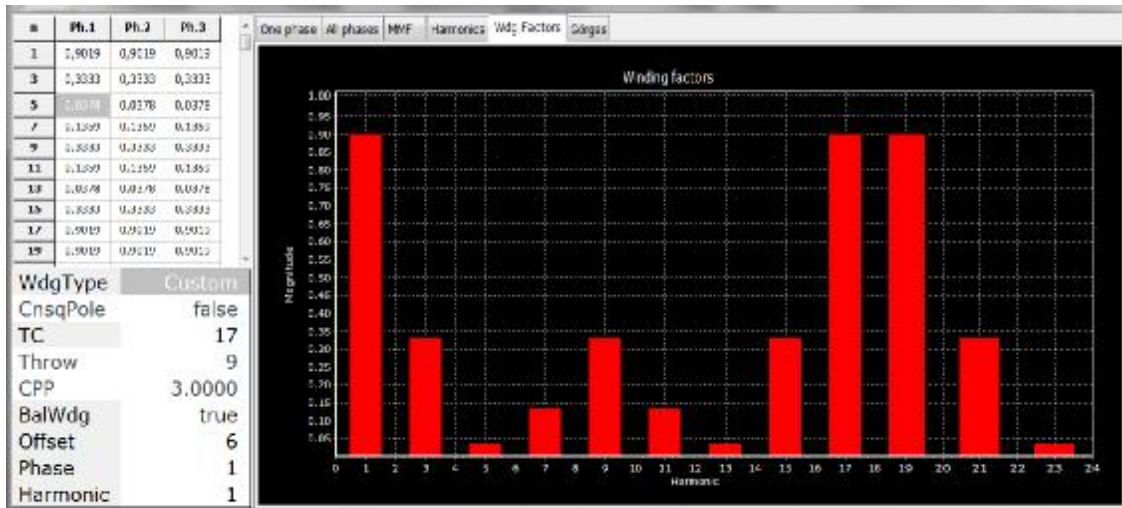


Fig IV.11. Interface de facteur d'enroulement



- **GÖRGES** : Pour vérifier la séquence de phase, il est primordial le diagramme de Görges. On peut afficher soit les vecteurs de f.m.m ou bien les f.é.m de phase.

Lorsque l'on exploite les f.ém, celles-ci tournent dans le sens antihoraire, elles sont affichées dans l'ordre suivant ; rouge, jaune et bleue.

Si, par contre sont des f.m.m qui sont exploitées, les vecteurs sont fixés dans l'espace.

Ils sont positionnés de sorte que le flux tournant dans le sens positif (sens anti-horaire) doit traverser les repères fixes dans l'ordre : rouge-jaune –bleue.

Par ailleurs, d'autres options sont disponibles : composantes symétriques...

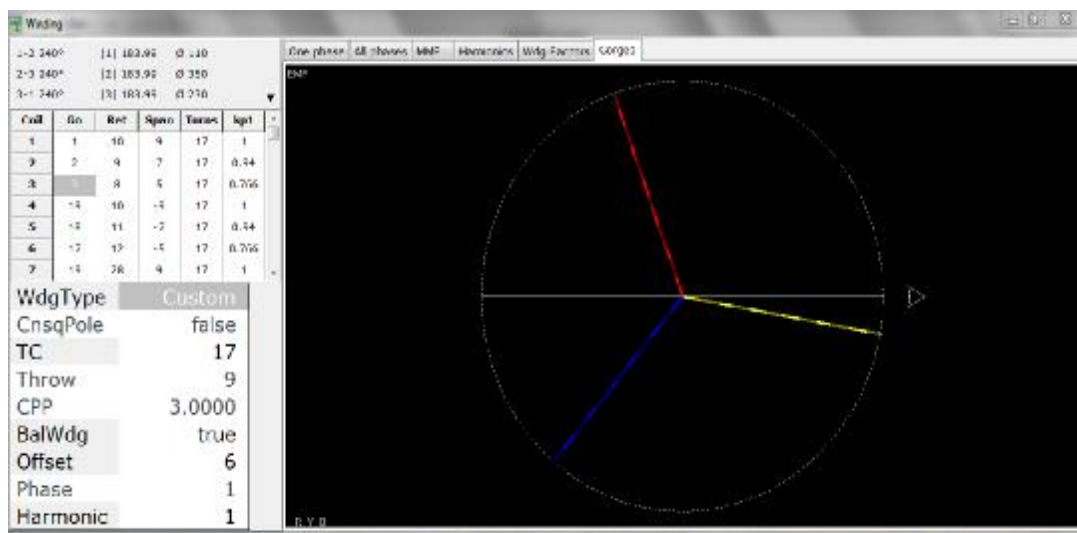


Fig IV.12. Système triphasé équilibré

IV.4.4. Sélection des matériaux à partir de la banque de données :

Le moteur que nous proposons de dimensionner présente une hauteur d'axe de 130 mm avec 4 pôles, il est réalisé à base d'une tôle magnétique (M600-50 A). Les caractéristiques de cette dernière doivent être insérées dans la banque de données du logiciel. Cette insertion se fait à travers différentes interfaces : **DESCRIPTION**, **MAGNETIZATION**, **LOSSES**, **MECHANICAL**, **THERMAL**. Un résumé est alors fourni automatiquement dans **DATAHEET**. Notons que Speed possède une bibliothèque de matériaux prédéfinie que l'utilisateur peut directement exploiter.



• **DISCRIPTION :**

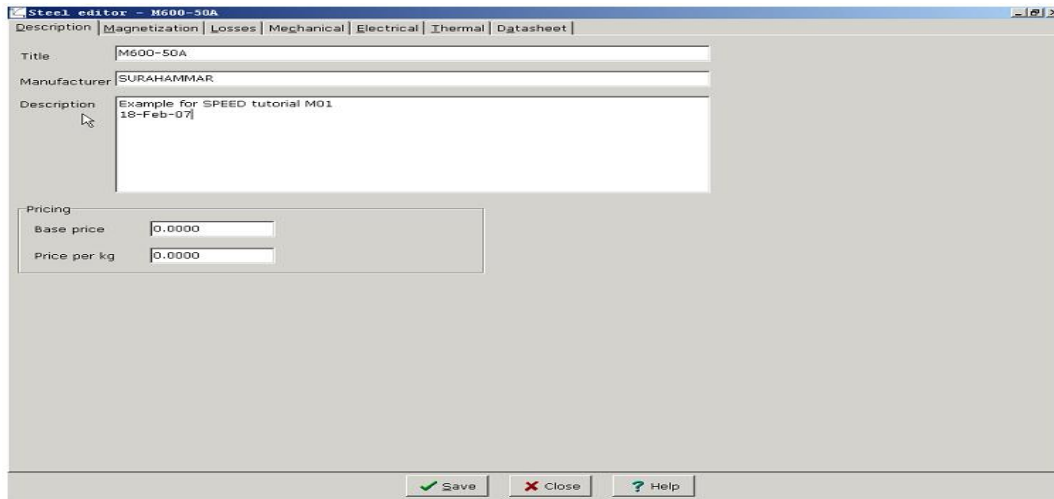


Fig IV.13. Interface de description du matériau utilisé.

• **MAGNETIZATION :** la courbe $B=f(H)$ caractéristique du matériau et montre son comportement en présence d'une excitation magnétique. La courbe présente trois zones :

La zone linéaire : Pour les faibles valeurs de H , le champ magnétique augmente proportionnellement par rapport à l'excitation.

Le coude de saturation : Pour des valeurs moyennes de H , le champ magnétique augmente plus faiblement avec l'excitation.

La saturation : Au dessus de certaine excitation, le champ magnétique n'augmente pratiquement pas. Le matériau est saturé.

Cette caractéristique est donnée par la figure suivante :

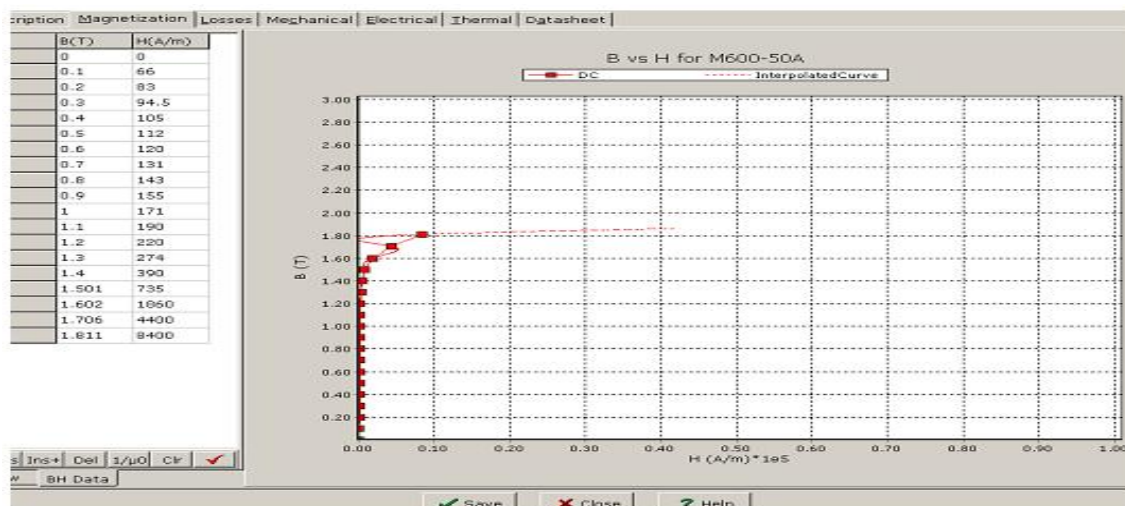


Fig IV.14. Courbe de première alimentation $B=f(H)$



• **DATASHEET :**



Fig IV.15. Résumé de la partie matériau.

IV.4.5. Design sheet :

La feuille de conception montre tous les paramètres de conception d'entrée et de rendement, et leurs unités appropriées. Cette partie est comportée de plusieurs interfaces.

- **DIMENSIONS :** Cette figure représente les dimensionnements de la feuille statorique et rotorique.

```

1 Dimensions : -----
Slots          36          Poles           4          Lstk          150.0000 mm
StatorOD      200.0000 mm  RotorOD       129.5600 mm  Gap           0.2000 mm
StatorID      129.9600 mm  RotorID       48.1300 mm  MConfig      Int

STATOR..
Rad3          100.0000 mm  Rlg           64.9800 mm
S-slot       Round      ASlot         89.0927 mm^2  ASlotLL      76.0080 mm^2
SD_S         15.7471 mm  SO_S          3.9300 mm    TW_S         6.4000 mm
TGD_S        0.8000 mm  TGANG_S       0.1000 mDeg  SOAng        -4.9000 mDeg
STOH         0.5489 mm  SBWid         7.0298 mm    SYoke        19.2729 mm
NSDuct       0          WSDuct        0.5000 mm    LFeS         145.5000 mm
SWedge       NonMag      muWedge       1.0000

ROTOR..
Rad1          64.7800 mm  Rad0          24.0650 mm  RadSh        24.0000 mm
Bar1          C-Custom   R_Bars        28          DblCage      false
Skew          0.0000  SSlots       LB           150.0000 mm  BarExt       0.0000 mm
ARslot       85.0166 mm^2  Abar         85.0166 mm^2  Shrink       0.0000
muPlug       1.0000  SBFull       true         RYoke        17.8877 mm

Rotor slot dimensions..
R_Bridge     0.8000 mm
Dbar         106.6677 mm
    
```

Fig IV.16. Interface de dimensionnement



- **CONTROL** : Une récapitulation des caractéristiques globales est donnée dans l'interface représentée sur la figure suivante

```

3 Control Data : -----
CalcMode    f/PowerSh
Freq        50.0000 Hz      PowrSh..   5500.0000 W
rpmS        1500.0000 rpm   rpm         1470.2512 rpm   Slip        0.0198 p.u.
Vs          400.0000 V      Drive       AC_Volts
    
```

Fig IV.17. Interface de contrôle.

- **EQ.CCT** : Les résultats de circuit équivalent sont dans la figure suivante :

```

5 Equivalent circuit parameters : -----
R1          5.0737 ohm    X1          4.7886 ohm    X1unsat     4.7886 ohm
R2          1.3175 ohm    X2          8.4499 ohm    X2unsat     4.7307 ohm
Rc          2325.8481 ohm Xr0         225.0753 ohm    Xm          177.2972 ohm
Rbar        1.0647 ohm    REndRing   0.2527 ohm     Erb         19.9817 V
R_rotor     9.0808E-05 ohm X_rotor     5.8242E-04 ohm XErb        1.0000
EQcct       SPEED      RLoc       GapFlux
DeepBar     Boldea     K_r         1.0001         K_x         1.0000
EndLeak     SPEED     XKr_DB      1.0000         XKr_DB      1.0000
DiffLeak    CGV       CoilFill    1.0000         kEndCoil    1.0000
LkSat       None     XXlend      1.0000         XX2end      1.0000
kzz         1.0000     DiffSat     false          Alzz        Normal
Xkzz        1.0000     kXL1        1.0000         kXL2        1.7862
XXm         1.0000     kX1slot     1.0000         kX2slot     1.0000
            1.0000     XkX1slot    1.0000         XkX2slot    1.0000
            1.0000     XXL1        1.0000         XXL2        1.0000

Equivalent wye..
R1_eqy     1.6912 ohm    R2_eqy     0.4392 ohm    Rc_eqy      775.2827 ohm
X1_eqy     1.5962 ohm    X2_eqy     1.5769 ohm    Xm_eqy      59.0991 ohm

Unsaturated reactance components..
X1slot     0.8518 ohm    Xlend      0.5844 ohm    Xldiff      3.3524 ohm
X1belt     0.7585 ohm    Xlzz       2.5939 ohm    X1skew      0.0000 ohm
X2slot     1.1135 ohm    X2end      0.2649 ohm    X2diff      3.3524 ohm
X2belt     0.7585 ohm    X2zz       2.5939 ohm    X2skew      0.0000 ohm
    
```

Fig IV.18. Interface de circuit équivalent.

- **PERFORMANCE** : Dans cette figure, on a les différentes performances de la machine.

```

6 Performance : -----
OpMode      Motoring
Vt          400.0000 V      rpm         1470.2512 rpm   Slip        0.0198 p.u.
Pshaft      5499.6182 W     PElec       6475.7762 W     Tshaft      35.7201 Nm
PshaftHP    7.3751 h.p.       P.F.        0.8926         Effcy       84.9260 %
            WTotal      976.1580 W     Eff_X_PF    75.8047 %

Currents..
Iph1        6.0458 A rms    IL1         10.4717 A rms   I2          5.3726 A
Imc         2.0351 A      IMag        2.0292 A       Ic          0.1547 A

Equivalent circuit voltages..
E1          359.7679 V     VR1         30.6745 V      VX1         28.9511 V
ER2         349.8217 V     VR2         7.0782 V      VX2         45.3982 V

Losses and related parameters..
WCuS        556.3568 W     WCuR        114.0859 W     WIron       166.9493 W
SLLCalc     ANSIC50     WSSL        66.7970 W      Wwf         71.9689 W
Jrms        5.3272 A/mm^2  JBar1       2.4916 A/mm^2  J_ER        2.1544 A/mm^2
            J_Rotor     2.3329 A/mm^2

Other performance parameters..
PGap        5752.4700 W     EMTorque    36.6214 Nm
    
```

Fig IV.19. Interface des performances.



- **CORE LOSS** : Dans ce menu, on affiche les différentes pertes de la machine.

7 Core losses, Harmonic losses, and Stray Load Losses : -----					
WFeS	166.9493 W	Wst	66.4647 W	WstWkg	9.5796 W/kg
WFeR	0.0000 W	Wsy	100.4846 W	WsyWkg	8.0841 W/kg
WFeCalc	Classical	XFe	1.0000	Bd_slot	0.9031 T

Fig IV.20. Interface des pertes.

IV. Conclusion

Dans le présent chapitre, un calcul de dimensionnement d'un moteur asynchrone d'une puissance 5.5 kW, a été effectué en exploitant le logiciel Speed PC-imd.

Dans le chapitre suivant, nous menons à faire une comparaison entre les différents résultats obtenu par le logiciel SPEED-imd et le logiciel Matlab.

Chapitre V

*» Comparaison des résultats des deux logiciels
Matlab et SPEED-imd*

Introduction :

Dans le présent chapitre, on va faire une comparaison des résultats géométriques obtenus par calcul avec le logiciel Matlab et ceux réel, ensuite la comparaison des performances de la machine obtenu par Speed-imd et ceux obtenus par calcul (Matlab).

V.1. Tableau des résultats des contraintes électromagnétiques du moteur obtenus par SPEED:

<i>Les les resultas de speed</i>			
<i>désignations</i>	<i>Symbole</i>	<i>Valeur</i>	<i>Unité</i>
Courant simple par phase	I_{ph1}	7.2698	A
Les pertes totales dans le stator	$WCuS$	556.35	W
Les pertes totales dans le stator	$WCuR$	114.08	W
La puissance absorbée par le moteur	P_1	6473.90	W
Le rendement	η	84%	

Dans la suite, nous menons à faire une comparaison des résultats géométrique obtenus par MATLAB et ceux réels.

V.2. Tableau comparaison des contraintes géométrique

Tableau comparaison des contraintes géométrique				
<i>désignations</i>	<i>Symbole</i>	<i>Valeurs de logiciel Matlab</i>	<i>Valeurs réelles</i>	<i>Unité</i>
Diamètre extérieur de stator	Dext1	200	200	mm
Diamètre intérieur de stator	Dint1	131	129.96.	mm
Diamètre extérieur de rotor	D2ext	130	129.56	mm
Diamètre intérieur de rotor	D2int	41.66	48.13	mm
Nombres d'encoche statorique	Z1	36	36	
Nombres d'encoche rotorique	Z2	28	28	
La longueur de paquet	Li	128.3402	150	mm
Le largueur de la dent statorique	bz1	5.7	6.1	mm
Induction magnétique dans les dents statorique	Bz1max	1.85	1.64	T
Induction magnétique dans les dents rotorique	Bz2max	1.8	1.63	T
Induction magnétique dans le dos du stator	Bc1	1.4	1.5	T
Induction magnétique dans le dos du rotor	Bc2	1.4	1.5	T
induction magnétique dans l'entrefer	Bd	0.903	0.88	T

Interprétation :

On remarque que les valeurs des résultats géométriques calculées sont proches de ceux utilisés dans la construction réelle.

Finalement, nous menons à faire une comparaison des résultats électromagnétique obtenus par MATLAB et ceux de logiciel SPEED.

V.3. Tableau comparaison des contraintes électromagnétique

<i>Tableau comparaison des contraintes électromagnétique</i>				
<i>désignations</i>	<i>Symbole</i>	<i>Valeur de logiciel Speed</i>	<i>Valeur de Matlab</i>	<i>Unité</i>
Courant simple par phase	I _{ph1}	7.2698	6.4192	A
Les pertes totales dans le stator	WCuS	556.35	498.77	W
Les pertes totales dans le stator	WCuR	114.08	109.75	W
La puissance absorbée par le moteur	P ₁	6473.90	6167.3	W
Le rendement	η	84	89	%

Interprétation :

Le tableau V-6 représente les résultats des pertes dans les différentes parties de la machine, ainsi le rendement. On remarque que les différentes valeurs sont différentes ce qui implique des rendements différents. Ceci peut être expliqué par la différence de la section des conducteurs, de dimension de circuit magnétique et la qualité de la tôle. On remarque aussi que la plus grande partie de ces pertes située dans les enroulements statorique.

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a fait une comparaison des dimensions géométrique et des contraintes électromagnétique, ainsi que les différentes pertes et les paramètres nominaux calculés par le logiciel Matlab et celles utilisé dans la pratique.

Il existe des écarts entre les résultats pratiques et théorique mais toute sont proche au cahier des charge.

» *Conclusion générale*

» *Conclusion Générale*

Dans ce mémoire, on s'est intéressé au calcul et à la CAO des machines électriques et plus particulièrement les moteurs à induction. Lorsque 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.

Mon travail d'étude consiste d'une part à dimensionner une machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil 5,5 kW en élaborant un code de calcul sous environnement Matlab en exploitant les formules empiriques utilisées par les constructeurs de machines, et d'autre part, effectuer un stage au sein de l'entreprise Electro-Industrie afin d'exploiter le logiciel SPEED (PC-IMD) utilisé pour déterminer les performances des machines asynchrones construites par l'usine.

Un dimensionnement d'un moteur de puissance 5.5 kW a été fait. Les résultats obtenus sont conformes au cahier de charge

L'étude que nous avons faite, nous a permis d'approfondir et d'enrichir nos connaissances dans le domaine de construction des machines électrique, en particulièrement les machines asynchrones triphasé.

La difficulté des calculs réside dans le nombre élevé des formules utilisées qui sont liées entre elles par des paramètres ainsi que les différents coefficients et facteurs.

En fin on peut dire que le domaine de calcul et de dimensionnement des machines électrique est très vaste, vu la différence des méthodes utilisées, mais le bute serte le même c'est l'amélioration et le développement des performances des machines.



» *Bibliographie*

Bibliographie

- [1] M. Jufer et J. C. Sabonnadière, « Conception Assistée par Ordinateur (CAO), Moteur Asynchrone », Techniques de l'ingénieur, Traité Génie Electrique, D 3 590, pp. 1-16.
- [2] BOUCHARD, R.P, OLIVIER, G, « Conception de moteurs asynchrones triphasés », édition de l'école polytechnique de Montréal, 1997.
- [3] G.LEMASSON ET L.BLAIN, « Matériaux de construction mécanique et électrique », Edition Dunod, Paris, 1976.
- [4] A.BENTOUNSI, « Circuits électriques électrotechniques », Collection génie électrique, 1994.a
- [5] B.NOGAREDE, « Machines tournantes: Principes et constitution », Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, D 3 411.
- [6] J, SAINT-MICHEL, « Bobinage des machines tournantes à courant alternatif », Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, D 3 420.
- [7] Michel POLODJADOFF : « Machine asynchrone, régime permanent ». Technique de l'ingénieur, traité génie électrique. D3480.1998.
- [8] Site : <http://genie.industriel.iaa.free.fr>
- [9] REBBAH REDJEM: « Calcul et Conception Assistée par Ordinateur des Machines Electriques »
- [10] *WILDI. SYBILLE . ELECTRITECHNIQUE 4^{eme} Edition*
- [11]Eric Duhayon, C. Henaux, Y. Alhassoun and B.Nogarede, « Design of a high speed switched reluctance generator for aircraft applications », ICEM 2002, Brugge- Belgium.
- [12] B. Nogarede, C. Henaux, J-F Rouchon , « Des nouveaux matériaux aux machines électriques du future- quelques pistes prometteuses », CEMD, Cachan, 1999.
- [13] D.STATON: Speed PC- IMD User's Guide. UNIVERSITY OF GLASGOW. 2004.

A decorative banner with a wavy, ribbon-like shape. The banner has a color gradient from light green at the top to yellow at the bottom, with a dark brown shadow underneath. The word "Annexe" is written in a dark green, cursive font across the center. On the left and right sides, there are decorative vertical elements consisting of green leaves and silver, dotted, vine-like patterns.

Annexe

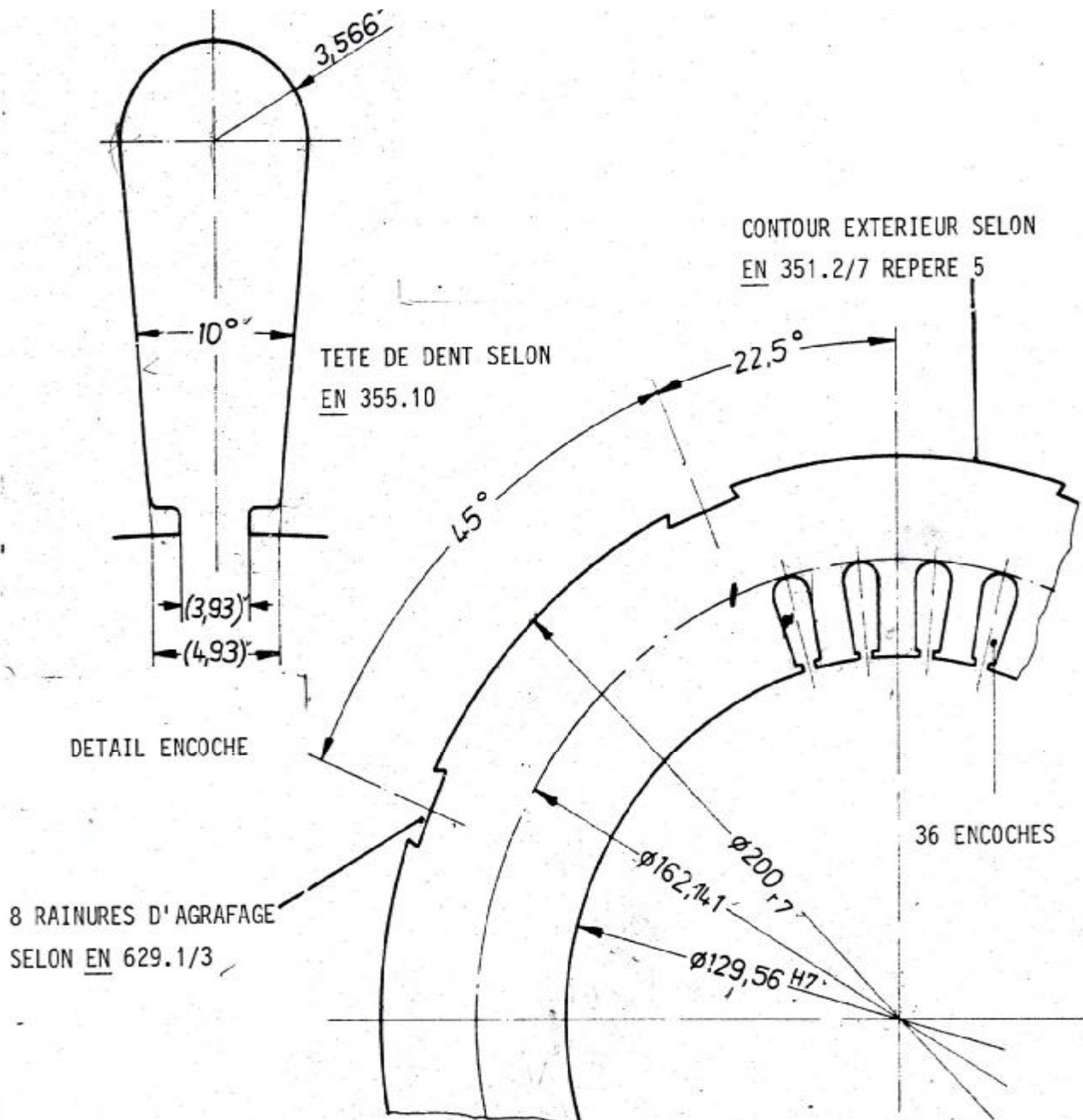


Fig III.1. La forme géométrique de la feuille statorique

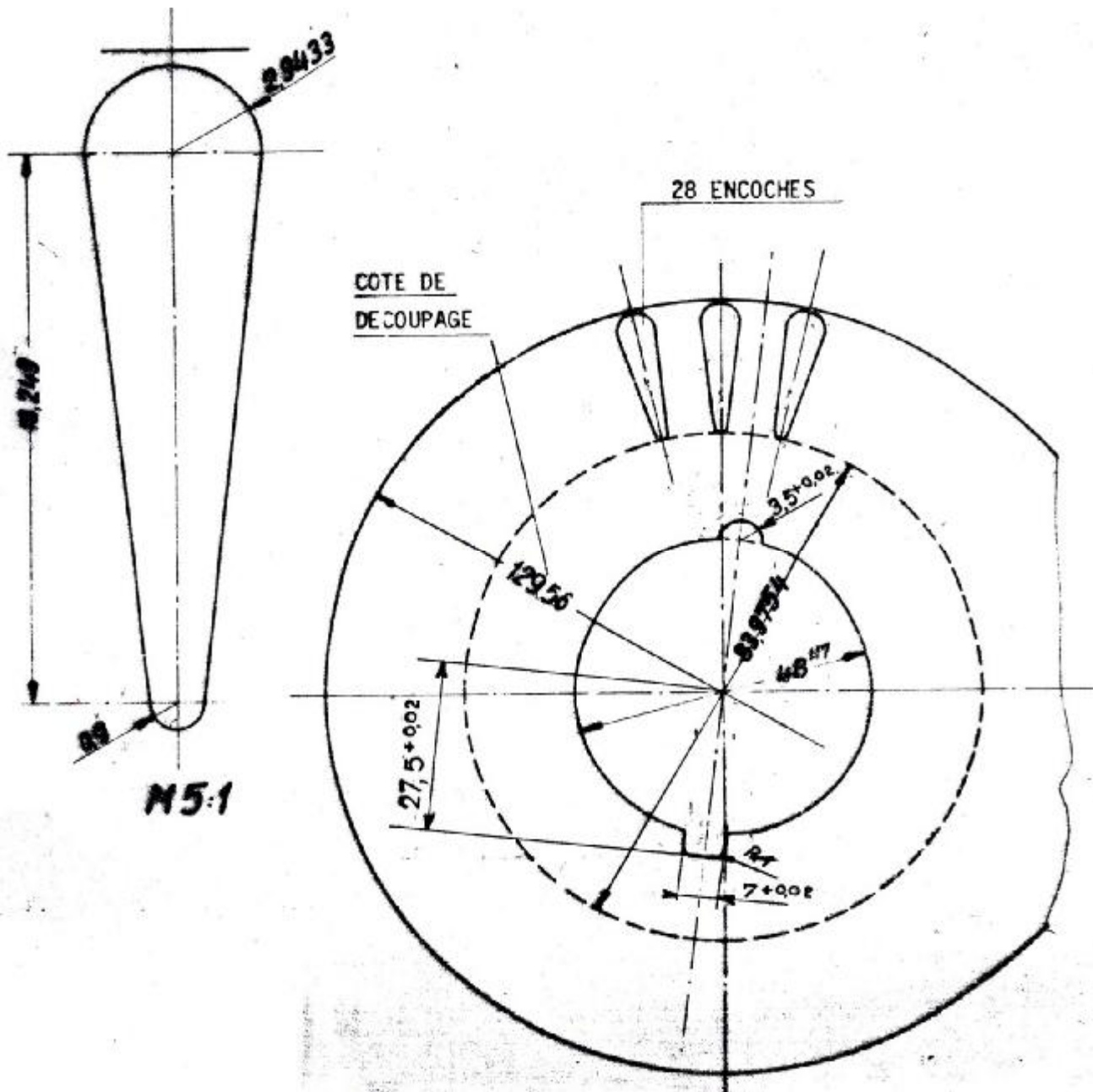


Fig III.2. La forme géométrique de la feuille rotorique

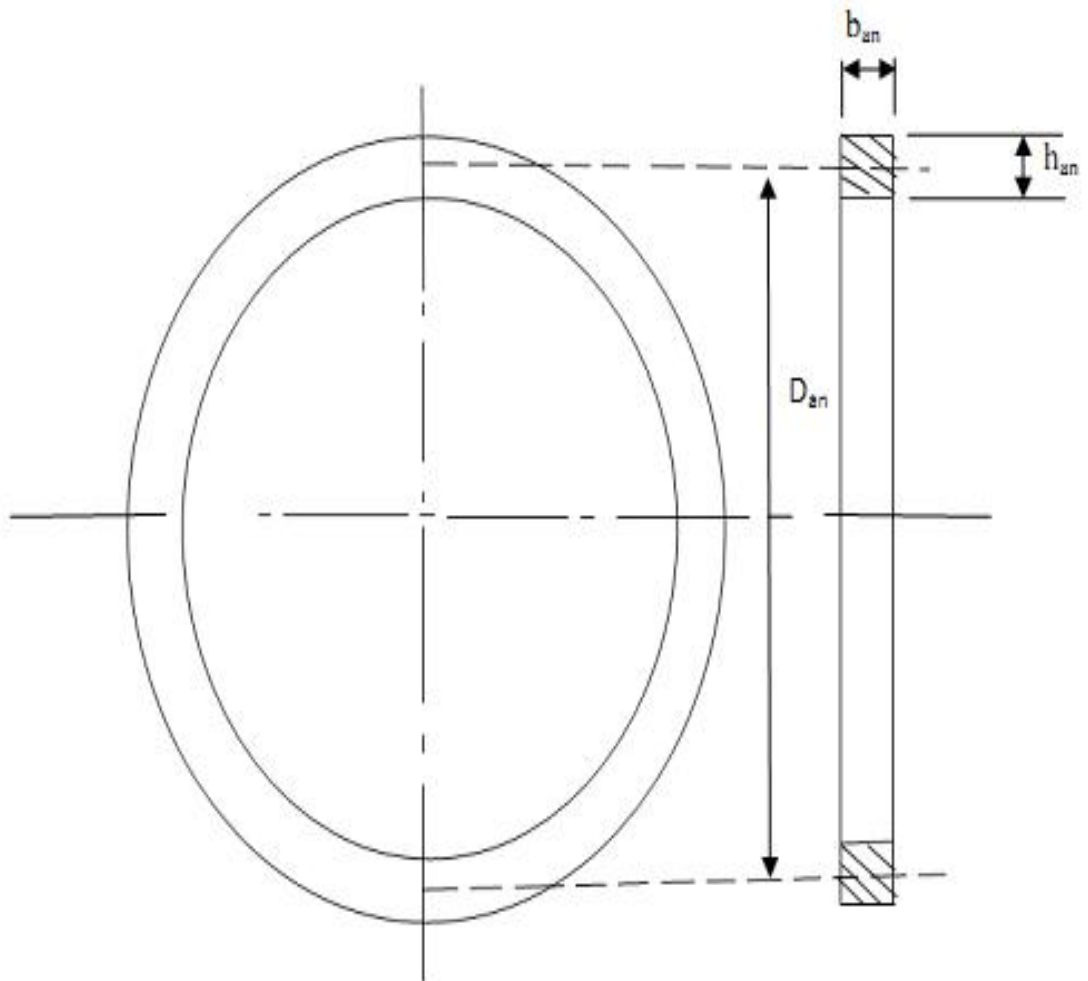


Figure : Dimensionnement de l'anneau de court-circuit

Tableau III.1 : Les sections standard

<i>Diamètre sans isolant [mm]</i>	<i>Diamètre avec isolant [mm]</i>	<i>Section sans isolant [mm]</i>
0,75	0,815	0,442
0,80	0,865	0,503
0,85	0,915	0,567
0,90	0,965	0,636
0,95	1,015	0,709
1,00	1,080	0,785
1,06	1,140	0,883
1,12	1,200	0,985
1,18	1,260	1,094
1,25	1,330	1,227
1,32	1,405	1,368
1,40	1,485	1,539
1,50	1,585	1,767
1,60	1,685	2,011
1,70	1,785	2,270
1,80	1,885	2,540
1,90	1,995	2,830

Tableau III.2 : Induction maximale

stator				rotor			
h [mm]	2p	B _{z1Max} [Tesla]	B _{c1} [Tesla]	h [mm]	2p	B _{z2Max} [Tesla]	B _{c2} [Tesla]
50-132	2	1,75÷1,95	1,50÷1,65	50-132	2	1,75÷1,95	1,35÷1,45
	4	1,75÷1,95	1,50÷1,65		4	1,75÷1,95	1,35÷1,25
	6	1,75÷1,95	1,50÷1,60		6	1,75÷1,95	1,05÷1,15
160	2	1,75÷2,00	1,45÷1,70	160	2	1,75÷1,95	1,35÷1,45
	4	1,75÷2,00	1,45÷1,70		4	1,55÷1,80	1,20÷1,30
	6	1,75÷1,85	1,35÷1,50		6	1,65÷1,90	1,05÷1,15
180-250	2	1,70÷1,90	1,45÷1,65	180-250	2	1,70÷1,95	1,35÷1,45
	4	1,70÷1,90	1,45÷1,65		4	1,65÷1,90	1,15÷1,25
	6	1,70÷1,90	1,45÷1,65		6	1,65÷1,90	1,05÷1,15
280-350	2	1,70÷1,90	1,40÷1,60	280-350	2	1,60÷1,85	1,35÷1,45
	4	1,60÷1,80	1,30÷1,45		4	1,80÷2,00	1,15÷1,25
	6	1,60÷1,80	1,15÷1,30		6	1,65÷1,90	1,05÷1,15

Tableau III.3: Intensité de champ magnétique dans la culasse qui correspond à B_{c1} et B_{c2}

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	221
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	3041	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	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1.9	2000	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2.0	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8409	9000	9700

Tableau III.4: Intensité de champ magnétique dans la dent statorique et rotorique qui correspond à B_{z1} et B_{z2}

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	156	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	246	250	253
0.8	256	259	262	265	268	240	243	247	250	253
0.9	286	290	293	297	301	304	208	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	126000	13200	13800
2.3	14400	15100	15800	165000	17200	18000	18800	19600	20500	21400

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 : K_{ddl} en fonction de Z1/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

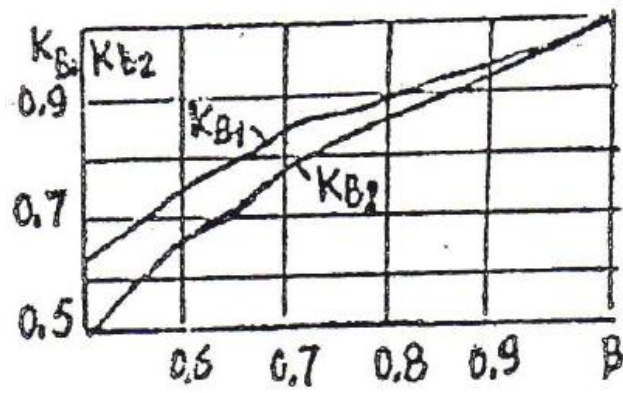


Fig III.3. , en fonction du rapport de Raccourcissement

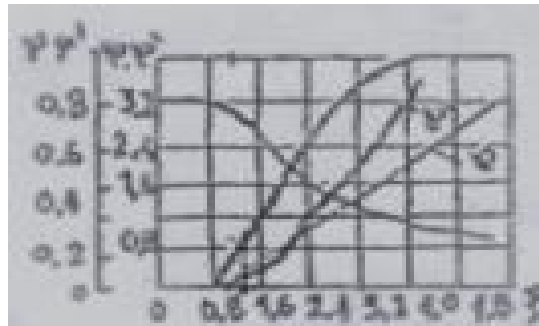


Fig III.4

