



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Electrotechnique

---

Présenté et soutenu par :  
koussila belaiche et Djareb Hani

Le : jeudi 3er juin 2025

## Conception d'un Moteur Asynchrone Triphasé

---

Année universitaire: 2024-2025

# Remerciements

## ***Remerciements***

Nous remercions Dieu Tout-Puissant qui nous a permis d'achever ce travail, et nous Lui demandons que ce que nous avons appris nous soit utile dans notre parcours académique et professionnel.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les enseignants qui nous ont accompagnés tout au long de notre formation, en particulier au sein du département de génie électrique, pour les efforts qu'ils ont fournis dans la transmission du savoir.

Nous exprimons une gratitude particulière à **Monsieur Pr.ALOUI Lotfi** pour ses conseils précieux, sa patience et son suivi rigoureux tout au long de la réalisation de ce projet. Nous remercions également Pr.**Monsieur MIMOUN** pour son soutien, ses encouragements et son implication positive.

Nous n'oublions pas de remercier tous ceux qui nous ont soutenus, même par un mot aimable, parmi nos camarades, nos amis et nos familles. Nous tenons à citer en particulier notre collègue **Anes Cherif**, pour son aide et son appui tout au long de ce parcours

# Dédicace

## ***Dédicace***

À ceux qui ont semé en nous l'amour du savoir et veillé sur notre éducation...

À nos chères mères et à nos précieux pères, symboles de sacrifice et de prières, tout ce que nous sommes aujourd'hui leur est dû...

À nos frères et sœurs, qui ont partagé nos peines et nous ont soutenus par leurs paroles et leurs sourires...

À tous ceux qui ont cru en nous et nous ont encouragés tout au long de notre parcours universitaire...

Nous dédions ce modeste travail en signe de reconnaissance et de gratitude.

# Sommaire

# Sommaire

## Sommaire

|                                                                                  |        |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Dédicace .....                                                                   | ج      |
| Sommaire.....                                                                    | ا      |
| Liste des figures .....                                                          | c      |
| Chapitre I Generalites Sur La Construction Et La C.A.O Des Machines Asynchrones. |        |
| I.1 Introduction:.....                                                           | - 3 -  |
| I.2 Machine Asynchrone : .....                                                   | - 3 -  |
| I.3 Construction du moteur asynchrone triphase : .....                           | - 4 -  |
| I.3.1 Stator.....                                                                | - 5 -  |
| I.3.2 Rotor.....                                                                 | - 5 -  |
| I.3.3 Rotor bobiné (à bague).....                                                | - 5 -  |
| I.3.4 Rotor à cage (rotor en court-circuit).....                                 | - 6 -  |
| I.3.5 Rotor à double cage.....                                                   | - 6 -  |
| I.3.6 Rotor à double encoche ou à encoches profondes.....                        | - 7 -  |
| I.4 l'entrefer.....                                                              | - 7 -  |
| I.5 Bobinages:.....                                                              | - 8 -  |
| I.6 L'isolation.....                                                             | - 8 -  |
| I.7 Les organes mécaniques.....                                                  | - 9 -  |
| I.7.1 La carcasse.....                                                           | - 9 -  |
| I.7.2 L'arbre.....                                                               | - 9 -  |
| I.7.3 Paliers.....                                                               | - 10 - |
| I.8 Utilisation.....                                                             | - 11 - |
| I.8.1 Moteur asynchrone.....                                                     | - 11 - |
| I.8.2 Générateur asynchrone.....                                                 | - 11 - |
| I.9 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone.....                     | - 11 - |
| I.10 Le glissement.....                                                          | - 12 - |
| I.11 Bilan de puissance.....                                                     | - 12 - |
| I.12 Définitions et étapes de CAO.....                                           | - 13 - |
| I.13 CAO des machines électriques.....                                           | - 14 - |
| I.14 Présentation du logiciel ANSYS-Maxwell.....                                 | - 14 - |
| Chapitre II bobinage des machines électriques                                    |        |
| I.15 Conclusion.....                                                             | - 15 - |
| II.1 Introduction.....                                                           | - 15 - |

|                                                                       |        |
|-----------------------------------------------------------------------|--------|
| II.2 Enroulement des machines électriques.....                        | - 15 - |
| II.3 Définition des enroulements de la machine asynchrone.....        | - 19 - |
| II.4 Enroulement d'induit dans les machines à courant alternatif..... | - 19 - |
| II.4.1 Bobinage par bobines.....                                      | - 19 - |
| II.4.2 Bobinage par barres.....                                       | - 20 - |
| II.5 Différents types d'enroulements triphasés.....                   | - 20 - |
| II.5.1 Enroulement triphasé à une couche.....                         | - 20 - |
| II.5.2 Enroulement triphasé à deux couches.....                       | - 21 - |
| II.5.3 Enroulement par pôles conséquent.....                          | - 22 - |
| II.5.4 Enroulement par pôles .....                                    | - 22 - |
| II.5.5 Les enroulements réguliers.....                                | - 23 - |
| II.5.6 Enroulements semi – réguliers.....                             | - 23 - |
| II.5.7 Les enroulements irréguliers.....                              | - 23 - |
| II.6 Bobinag.....                                                     | - 23 - |
| II.6.1 Bobinage concentré.....                                        | - 23 - |
| II.6.2 Bobinage distribué.....                                        | - 24 - |
| II.7 types de bobinage distribué.....                                 | - 25 - |
| II.7.1 Bobinage imbriqué.....                                         | - 25 - |
| II.7.2 Bobinage ondulé.....                                           | - 25 - |
| II.7.3 d'enroulement rétrograde et progressif.....                    | - 26 - |
| II.8 les pas des sections ou des bobines.....                         | - 27 - |
| II.8.1 Le pas diamétral.....                                          | - 27 - |
| II.8.2 Le pas raccourci.....                                          | - 27 - |
| II.8.3 Le pas allongé.....                                            | - 27 - |
| II.9 Coefficient de bobinage kb.....                                  | - 27 - |
| II.10 Conditions de réalisation d'un bobinage triphasé.....           | - 27 - |
| II.11 Choix des enroulements pour courant alternatif.....             | - 28 - |
| II.12 Rappel sur les paramètres géométriques des enroulements.....    | - 28 - |
| II.13 Conclusion.....                                                 | - 30 - |

### *Chapitre III: Les calcule preliminaire*

|                                                              |        |
|--------------------------------------------------------------|--------|
| III.1 Introduction.....                                      | - 28 - |
| III.2 Les normes techniques adoptées dans le calcul.....     | - 28 - |
| III.2.1 choix de la charge magnétique spécifique, 'Be' ..... | - 28 - |
| III.2.2 Les calcules de conception.....                      | - 31 - |
| III.2.3 rotor .....                                          | - 38 - |
| III.3 Le tableau de resultat.....                            | - 42 - |
| IV Conclusion générale.....                                  | - 40 - |
| Références bibliographiques .....                            | - 41 - |



### Liste des symboles :

|               |                                                               |
|---------------|---------------------------------------------------------------|
| $f$           | :frequence                                                    |
| $V_{ph}$      | : tension d'alimentation                                      |
| $I_{ph}$      | : Courant par phase du stator                                 |
| $\eta$        | : Rendement de la machine                                     |
| $N_s$         | : vitesse de synchronisme en tours par minute (tr/min)        |
| $T_{ph}$      | : Nombre de spires par phase du stator                        |
| $\cos\varphi$ | :facteur de puissances                                        |
| $\Phi$        | : le flux par pole par phase                                  |
| $K_w$         | : Coefficient de bobinage                                     |
| $n_s$         | : vitesse de synchronisme en tours par second (tr/s)          |
| $P_u$         | : puissance utile de la machine                               |
| $a_c$         | : la charge électrique spécifique                             |
| $B_e$         | : Induction magnétique moyenne dans l'entrefer                |
| $C_0$         | : coefficient utilisation de la machine                       |
| $\tau_p$      | : le pas polaire                                              |
| $\lambda$     | : le coefficient geometrique                                  |
| $D$           | : la diametre d'alissage                                      |
| $L$           | : la longueur de la machine                                   |
| $L_I$         | : la longueur active de la machine                            |
| $k_f$         | : facteur de foisonnement                                     |
| $l_{vt}$      | : longueur d'un canal de ventilation                          |
| $n_{vt}$      | : nombre de canaux de ventilation                             |
| $P$           | : nombre de pol                                               |
| $A_s$         | : Surface de la section transversale du conducteur statorique |
| $\delta_s$    | : la densite de corent dans une conducteur de stator          |
| $a_s$         | : nombre de fil                                               |
| $D_c$         | : Le diamètre du fil                                          |
| $S_s$         | : Nombre total d'encoches du stator                           |
| $Y_{ss}$      | : pas d'encoche                                               |
| $m$           | :nombre d'encoche par pole et par phase                       |
| $Z_{ss}$      | : nombre de conducteur par encoche                            |
| $E_s$         | : La surface total de l'encoche                               |
| $C_{rem}$     | : coefficient de remplissage                                  |
| $S_{cui}$     | : la surface de cuivre d'une encoche                          |
| $n_v$         | : Nombre de conducteurs verticalement                         |
| $n_h$         | : Nombre de conducteurs horizontalement                       |
| $h_{s1}$      | : hauteur de l'encoche statorique                             |
| $b_{s1}$      | : largeur de l'encoche statorique                             |
| $b_{01}$      | : Ouverture de l'encoche statorique                           |
| $B'_{tsmoy}$  | : L'induction moyenne dans les dents statoriques              |
| $B_{cmoy}$    | : l'induction moyenne dans la culasse statoriques             |
| $h_c$         | : hauteur de la culasse statorique                            |
| $D_{ext}$     | : Diamètre extérieur du stator                                |
| $L_g$         | : Epaisseur de l'entrefer                                     |
| $D_r$         | : diametre de rotor                                           |

$I_b$  : le courant de barre rotorique  
 $S_r$  : nombre d'encoche ( les barre ) rotorique  
 $R_b$  : la resistance de la barre de cage  
 $a_b$  : la section de la barre  
 $\varphi$  : la resistivite  
 $\delta_b$  : l'induction de courant de barre  
 $h_r$  : Hauteur de l'encoche rotorique  
 $b_r$  : Largeur d'encoche rotorique  
 $h_w$  : Hauteur d'entrée de l'encoche rotorique  
 $b_w$  : Largeur d'entrée de l'encoche rotorique  
 $B_{trmoy}$  : L'induction moyenne dans les dents rotorique  
 $B_{Cr moy}$  : L'induction moyenne dans la culasse rotorique  
 $A'_{tr}$  : Section de la zone des dents rotoriques par pôle  
 $h_{cr}$  : la hauteur de la culasse rotorique  
 $I_e$  : le courant dans l'anneau rotorique  
 $a_e$  : La section d'un anneau rotorique  
 $\delta_e$  : l'induction de courant de l'anneau  
 $v_s$  : Vitesse périphérique

# Liste des figures

## Listes des figures

|                                                                                                        |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Figure I .1: Machine Asynchrone .....                                                                  | - 4 -  |
| Figure I 2: Stator d'une machine asynchrone .....                                                      | - 5 -  |
| Figure I .3 : Rotor bobiné .....                                                                       | - 6 -  |
| Figure I 4 : cage d'écureuil .....                                                                     | - 6 -  |
| Figure I .5 : Rotor à double cage .....                                                                | - 7 -  |
| Figure I .6: La carcasse.....                                                                          | - 9 -  |
| Figure I .7: L'arbre.....                                                                              | - 9 -  |
| Figure I .8: Roulements à billes.....                                                                  | - 10 - |
| Figure I .9: Flasques .....                                                                            | - 10 - |
| Figure I .10: Ventilateur .....                                                                        | - 11 - |
| Figure I 11: Bilan de puissance .....                                                                  | - 13 - |
|                                                                                                        |        |
| Figure II.1: enroulements d'induit .....                                                               | - 16 - |
| FigureII.2: enroulements de champ (magnétiseurs) .....                                                 | - 16 - |
| FigureII3: enroulements de compensation.....                                                           | - 17 - |
| FigureII.4 : enroulements d'amortissement .....                                                        | - 18 - |
| FigureII.5: enroulements de commutation.....                                                           | - 18 - |
| Figure II 6 : des enroulements de la machine asynchrone .....                                          | - 19 - |
| Figure II 7: Bobinage par barres .....                                                                 | - 20 - |
| Figure II 8: à une couche .....                                                                        | - 21 - |
| Figure II 9: à deux couche .....                                                                       | - 21 - |
| Figure II 10: Enroulement par pôles conséquent .....                                                   | - 22 - |
| Figure II 11: Enroulement par pôles .....                                                              | - 23 - |
| Figure II 12: bobinage concentré .....                                                                 | - 24 - |
| Figure II 13: bobinage distribué .....                                                                 | - 25 - |
| Figure II 14: bobinage imbriqué.....                                                                   | - 25 - |
| Figure II 15: bobinage ondulé.....                                                                     | - 26 - |
| Figure II 16: (a) enroulement imbriqué progressif (b) enroulement imbriqué rétrograde .....            | - 26 - |
| Figure II 17: (a) enroulement ondulé progressif (b) enroulement ondulé rétrograde .....                | - 27 - |
|                                                                                                        |        |
| Figure III 1: bilan de puissance triangulaire .....                                                    | - 29 - |
| Figure III 2: courbe variation de coefficient géométrique $\lambda$ en fonction nombre de pôle p ..... | - 33 - |
| Figure III 3 : forme des encoches statorique .....                                                     | - 36 - |
| Figure III 4: dent de forme trapézoïdale .....                                                         | - 37 - |
| Figure III 5 : forme des encoches rotorique .....                                                      | - 40 - |
| Figure III 6: courbe les solides .....                                                                 | - 43 - |
| Figure III 7: courbe de couple .....                                                                   | - 44 - |
| Figure III 8: courbe des courants statorique .....                                                     | - 45 - |
| Figure III 9: courbe des tension induit .....                                                          | - 45 - |
| Figure III 10: courbe de Vitesse rotation .....                                                        | - 46 - |
| Figure III 11: courbe des courant .....                                                                | - 47 - |
| Figure III 12: courbe de couple resistive .....                                                        | - 48 - |
| Figure III 13: courbe de Vitesse de rotation.....                                                      | - 48 - |
| Figure III 14: courbe des pertes .....                                                                 | - 49 - |

## Résumé :

L'axe de ce mémoire est l'étude et l'analyse du moteur asynchrone triphasé d'un point de vue de conception et de modélisation.

Dans un premier temps, la structure physique du moteur a été abordée, y compris l'analyse de ses composants principaux. Par la suite, le bobinage a été étudié en tant qu'élément crucial dans la performance électromagnétique. Les différents types ont été comparés et leur influence sur la distribution du flux, la réduction des harmoniques et l'amélioration du rendement a été analysée.

Nous nous sommes appuyés, dans la phase de conception, sur des calculs préliminaires basés sur certains critères.

Enfin, un modèle de simulation a été élaboré en utilisant le logiciel ANSYS Maxwell, à partir d'un exemple applicatif conçu selon les données du cahier des charges. Les résultats obtenus ont été analysés et comparés aux résultats théoriques du modèle que nous avons conçu, dans le but d'évaluer la performance et de vérifier la conformité de la conception aux spécifications requise

## ملخص :

محور هذه المذكرة هو دراسة وتحليل المحرك غير المتزامن ثلاثي الطور من منظور تصميمي ونمذجي. في البداية، تم تناول البنية الفيزيائية للمحرك، بما في ذلك تحليل مكوناته الأساسية ثم لاحقاً دراسة البوبيناج باعتباره عنصراً حاسماً في الأداء الكهرومغناطيسي. تمت مقارنة الأنواع المختلفة وتحليل تأثيرها على توزيع الفيض، تقليل التوافقيات، وتحسين الكفاءة. اعتمدنا في مرحلة التصميم على حسابات أولية تستند إلى بعض المعايير وأخيراً، تم بناء نموذج محاكاة باستخدام برنامج ANSYS Maxwell ، انطلاقاً من مثال تطبيقي مصمم وفقاً لمعطيات دفتر الشروط، حيث تم تحليل نتائجه ومقارنتها بالنتائج النظرية للنموذج الذي صممناه بهدف تقييم الأداء والتحقق من توافق التصميم مع المواصفات المطلوبة.

## Abstract:

The focus of this thesis is the study and analysis of the three-phase asynchronous motor from a design and modeling perspective.

Initially, the physical structure of the motor was addressed, including an analysis of its main components. Subsequently, the winding was examined as a crucial element in the electromagnetic performance. Different winding types were compared, and their impact on flux distribution, harmonic reduction, and efficiency improvement was analyzed.

During the design phase, we relied on preliminary calculations based on specific criteria.

Finally, a simulation model was developed using the ANSYS Maxwell software, based on an application example designed according to the specifications provided in the technical requirements. The results obtained were analyzed and compared with the theoretical results of the model we developed, with the aim of evaluating performance and verifying the conformity of the design to the required specifications.

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Les machines électriques représentent l'un des piliers fondamentaux des infrastructures énergétiques modernes. Elles jouent un rôle central dans les applications de conversion et de gestion de l'énergie, que ce soit au niveau de la production, du transport ou de la consommation. Parmi ces dispositifs, la machine asynchrone occupe une place prépondérante, car elle constitue le choix privilégié dans la majorité des systèmes industriels, en raison de sa simplicité de fabrication, de sa robustesse mécanique et de ses faibles coûts de maintenance comparativement à d'autres types de machines. Elle est largement utilisée dans l'industrie manufacturière, les systèmes de pompage, les ascenseurs, la ventilation ainsi que dans les technologies liées aux énergies renouvelables, notamment les éoliennes.

Le fonctionnement de la machine asynchrone repose sur le principe de l'induction électromagnétique, résultant de l'interaction entre un champ magnétique tournant produit au niveau du stator et les courants induits dans le rotor. Le glissement entre la vitesse du champ tournant et celle du rotor est une caractéristique clé qui distingue ce type de machine des machines synchrones. Ce décalage dynamique est à l'origine de la dénomination « asynchrone ».

Cependant, la conception efficace d'une machine électrique ne se limite pas à la compréhension théorique de ses principes physiques ; elle requiert une approche d'ingénierie rigoureuse intégrant l'étude de la structure interne (stator/rotor), les types d'enroulements, l'isolation, le système de ventilation, ainsi que les propriétés magnétiques et thermiques des matériaux utilisés. C'est dans ce contexte que les outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) prennent tout leur sens, devenant des instruments incontournables dans le processus de développement industriel. Ces outils permettent aux ingénieurs de simuler numériquement le comportement électromagnétique et thermique de la machine, d'analyser les distributions de flux et les pertes énergétiques, tout en optimisant les paramètres de conception avant la phase de prototypage.

Le présent projet s'inscrit dans cette dynamique technico-scientifique. Il vise à réaliser une étude approfondie des machines asynchrones, en abordant leurs fondements théoriques, leur structure physique, et leur mode de fonctionnement. Une attention particulière sera portée à l'analyse des différents types d'enroulements électriques et à leur impact sur les performances

globales. Par ailleurs, une partie essentielle du travail est dédiée aux calculs préliminaires de dimensionnement, qui constituent la base technique nécessaire pour évaluer les performances attendues, la fiabilité, et l'efficacité énergétique de la machine conçue.

Le projet intègre également l'utilisation d'outils logiciels avancés, tels que ANSYS Maxwell, pour effectuer des simulations détaillées permettant de valider le design, d'identifier les points critiques, et de proposer des optimisations pertinentes. Cette approche complète, alliant théorie, pratique et outils numériques, confère à ce travail une valeur scientifique et technique notable dans le domaine du dimensionnement des machines électriques.

En somme, cette étude se veut une contribution pertinente au développement de solutions énergétiques fiables, efficaces et modernes, s'inscrivant pleinement dans les enjeux actuels de transition énergétique, d'amélioration du rendement et de durabilité des systèmes électromécanique



# ***Chapitre I***

**Generalites Sur La Construction Et La C.A.O Des  
Machines Asynchrones.**

## I.1 Introduction:

Ce chapitre inaugural établit les fondations de l'étude des machines asynchrones et de leur conception moderne. La machine asynchrone, ou « machine à induction », est définie comme un moteur triphasé à courant alternatif dont la simplicité constructrice et la robustesse expliquent l'usage généralisé en industrie. On y décrit ses éléments essentiels : le stator muni de ses enroulements, le rotor (à cage simple, cage double ou bobiné) monté sur un arbre et guidé par des paliers, l'entrefer assurant l'interaction magnétique, ainsi que la carcasse et le dispositif de ventilation garantissant la rigidité mécanique et le refroidissement. Le principe de fonctionnement repose sur la création d'un champ magnétique tournant par le stator et sur le glissement différence de vitesse entre ce champ et le rotor indispensable à la production du couple moteur. Les variantes de rotor sont comparées selon leurs performances au démarrage et en régime permanent. Enfin, l'importance d'un dimensionnement rigoureux est soulignée : géométrie des enroulements, choix des matériaux et gestion thermique influent directement sur le rendement et la durabilité. C'est pourquoi la conception assistée par ordinateur (CAO) est présentée comme un outil incontournable pour modéliser, simuler et optimiser ces paramètres avant toute phase de prototypage.

## I.2 Machine Asynchrone :

La machine asynchrone, également appelée machine à induction, est une machine électrique rotative fonctionnant en courant alternatif, caractérisée par l'absence de connexion électrique directe entre le stator et le rotor. Réversible, elle peut opérer selon deux modes : en **moteur** (convertissant l'énergie électrique en énergie mécanique) ou en **générateur** (transformant l'énergie mécanique en énergie électrique), et ce dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse. Son fonctionnement repose sur un induit en court-circuit, une particularité technique qui simplifie sa conception. Le moteur asynchrone triphasé, notamment, est massivement employé dans l'industrie grâce à sa robustesse, sa fiabilité et ses faibles besoins en maintenance.

Le qualificatif « asynchrone » s'explique par le décalage entre la vitesse de rotation du rotor et la fréquence du courant statorique. En effet, la vitesse de ces machines n'est pas systématiquement proportionnelle à la fréquence des courants qui les alimentent, ce qui constitue leur principal trait distinctif. [1]



Figure 1.1: Machine Asynchrone [30]

### I.3 Construction du moteur asynchrone triphase :

Le moteur asynchrone, fréquemment désigné comme moteur à induction, est structuré autour de deux éléments essentiels.

Ces derniers sont confectionnés à partir de tôles d'acier au silicium et sont munis d'encoches prévues pour accueillir les enroulements.

Le premier de ces éléments, le stator, est la partie fixe ; il héberge les enroulements qui sont connectés

à la source d'alimentation. Le second élément, le rotor, est monté sur un arbre et peut tourner librement.

On distingue deux principales catégories de rotors selon que leurs enroulements sont accessibles depuis l'extérieur ou qu'ils sont en circuit fermé de façon permanente : il s'agit du rotor bobiné et du rotor à cage d'écureuil.

Dans le cas du rotor bobiné, également connu sous le nom de rotor à bagues, l'enroulement triphasé (configuré en étoile ou en triangle) est raccordé à trois bagues. Celles-ci, par le biais de balais, rendent l'enroulement accessible extérieurement. Cette configuration permet de le court-circuiter (ce qui est le cas en fonctionnement normal), d'intégrer des résistances dans son circuit durant la phase de démarrage ou pour des conditions de fonctionnement spécifiques, ou encore de le connecter à un convertisseur de courant à thyristors pour moduler le courant de démarrage et la vitesse en régime établi.

Depuis quelques années, on observe un déclin de l'utilisation du moteur à bagues au profit du moteur à cage, ce dernier étant souvent piloté par des convertisseurs de fréquence variable.

Les encoches du rotor à cage d'écureuil contiennent des barres, généralement en cuivre ou en aluminium, qui sont reliées entre elles à chaque extrémité du rotor par des anneaux de court-circuit. Pour les moteurs de faible à moyenne puissance, les cages sont fabriquées en aluminium coulé sous vide partiel et sous pression. Ce processus de fabrication prévient la formation de bulles d'air dommageables dans les barres et permet de réaliser en une seule opération les barres, les anneaux d'extrémité et, parfois, les ailettes de ventilation. Cependant,

pour les petits moteurs de conception récente, l'usage d'ailettes en plastique est privilégié, car ce matériau est nettement moins coûteux que l'aluminium. [2]

### **I.3.1 Stator**

Le stator est assemblé à partir d'un empilage de tôles minces en acier au silicium, dont l'épaisseur unitaire oscille entre 0,35 et 0,50 mm. L'utilisation de tôles de faible épaisseur est privilégiée pour les moteurs où la réduction des pertes au sein du circuit magnétique est un objectif primordial. Lorsque le diamètre du moteur reste inférieur à quelques centaines de millimètres, les tôles sont généralement découpées d'une seule pièce. Pour les moteurs de dimensions plus importantes, les tôles constituant le stator et le rotor sont fabriquées par sections.

Afin de minimiser l'effet des courants de Foucault, il est courant d'appliquer sur les tôles une fine pellicule isolante, telle que du vernis ou du silicate de soude.

Dans de telles configurations, le rapport entre l'épaisseur réelle d'acier et l'épaisseur physique de l'ensemble des tôles empilées, connu sous le nom de coefficient de foisonnement, se trouve typiquement dans une fourchette de 0,92 à 0,94. [2]



**Figure I 2: Stator d'une machine asynchrone[31]**

### **I.3.2 Rotor**

Il s'agit de l'organe mobile du moteur. De manière similaire au circuit magnétique du stator, il est fabriqué à partir d'un empilement de tôles fines, isolées les unes des autres, qui forment un cylindre assujéti à l'arbre du moteur par une clavette.

Les rotors des machines asynchrones peuvent se présenter sous plusieurs formes distinctes [5]

### **I.3.3 Rotor bobiné (à bague)**

Le rotor renferme un enroulement bobiné, situé à l'intérieur d'un circuit magnétique. Ce circuit est lui-même formé par un empilement de disques montés sur l'arbre de la machine. Les encoches, usinées dans les tôles (constituant ces disques), sont théoriquement orientées parallèlement à l'axe du moteur. Toutefois, on leur applique une légère inclinaison par rapport à cet axe, dans le but de réduire certaines pertes occasionnées par les harmoniques d'espace.

Les terminaisons de l'enroulement du rotor sont amenées à l'extérieur et raccordées à des bagues. Ces bagues, installées sur l'arbre, sont en contact par frottement avec des balais en carbone. [6]



Figure I. 3: Rotor bobiné [32]

#### I.3.4 Rotor à cage (rotor en court-circuit)

Dans cette configuration, le circuit rotorique est composé de barres conductrices. Celles-ci sont disposées de manière régulière entre deux couronnes métalliques qui en constituent les extrémités, l'ensemble évoquant la forme d'une cage d'écureuil. Il va de soi que cette cage est logée à l'intérieur d'un circuit magnétique similaire à celui que l'on trouve sur un rotor bobiné. Les barres elles-mêmes sont confectionnées en cuivre, en bronze ou en aluminium, en fonction des propriétés mécaniques et électriques spécifiques visées par le constructeur. [6]

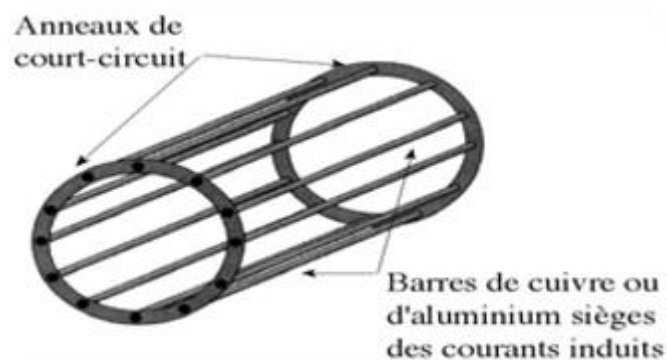


Figure I 4: cage d'écureuil [6]

#### I.3.5 Rotor à double cage

Ce type de rotor intègre deux cages disposées de manière coaxiale. La première, la cage externe, souvent constituée de laiton ou de bronze, présente une résistance électrique relativement élevée et est située à proximité immédiate de l'entrefer. La seconde, la cage interne, fabriquée en cuivre, possède une résistance plus faible et est logée plus profondément au sein du fer. La Figure I.5 illustre un rotor à double cage. [6]



**Figure I . 5: Rotor à double cage [6]**

### **I.3.6 Rotor à double encoche ou à encoches profondes**

Ce type de rotor est équipé d'une cage rotorique simple, caractérisée par des barres de section fortement aplatie qui s'insèrent profondément dans le circuit magnétique. Cette conception exploite le phénomène de refoulement du courant (ou effet de peau à basse fréquence) au sein des barres rotoriques. Ce phénomène a pour effet de limiter la pénétration du champ magnétique à l'intérieur du rotor, provoquant une concentration du courant dans la partie supérieure de la barre, la plus proche de l'entrefer. En conséquence, la section conductrice utile se trouve réduite, ce qui induit une augmentation de la résistance de la barre et, par voie de conséquence, une diminution du courant qui la parcourt. En régime de fonctionnement nominal, cet effet de refoulement s'atténue avec l'accroissement de la vitesse et la baisse concomitante de la fréquence des courants rotoriques, ce qui a pour résultat de diminuer la résistance effective des barres. [6]

## **I.4 l'entrefer:**

L'entrefer désigne l'espace qui sépare le rotor du stator. L'épaisseur de cet entrefer a une incidence considérable sur les performances de la machine asynchrone. Cette épaisseur varie, allant de quelques dixièmes de millimètre pour les machines de petite puissance jusqu'à plusieurs millimètres pour les machines de grande puissance. [7]

## I.5 Bobinages:

On peut effectuer le bobinage d'une machine tournante de plusieurs façons, mais on utilise habituellement deux enroulements à une seule ou à deux couches au stator, mais vu la forme des sections on distingue trois types d'enroulements les plus utilisées ; l'enroulement concentrique, imbriqué et ondulé. Chaque type présente des avantages dans certaines applications. L'enroulement imbriqué est le type de bobinage le plus employé dans les stators des moteurs triphasés des moyennes et grandes puissances. Même si ce type de bobinage peut être à simple couche, on choisit plutôt de le construire à double couche ; chaque bobine est formée de la moitié des conducteurs contenus dans une encoche et disposée de façon que l'un des cotés de la bobine soit dans le haut d'une encoche (coté supérieur) et l'autre dans le fond (coté inférieur). Puisque les bobines d'un enroulement imbriqué à double couches n'occupent que la moitié de l'encoche, on peut modifier la largeur et les placer dans une paire d'encoches qui ne correspond plus au pas d'encoche normal. Les bobines sont habituellement de largeur réduite et donnent un pas dit raccourci. Cette configuration complique le bobinage et sa mise en place, mais présente l'avantage, si le choix du pas raccourci est judicieux, d'atténuer les harmoniques de l'onde de flux et d'améliorer ainsi le comportement du moteur. L'enroulement ondulé est idéal pour les rotors des moteurs asynchrones à bagues. Dans le cas de petits moteurs asynchrones, particulièrement lorsque le bobinage est mécanisé ; on utilise généralement l'enroulement concentrique. La disposition de bobinage dans les encoches différencie ces différents types d'enroulements [3]

## I.6 L'isolation

L'isolation diélectrique entre les conducteurs, les enroulements (bobines) et le circuit magnétique est assurée par divers types de matériaux, souvent analogues, qu'ils soient ou non imprégnés d'huile. Des substances inorganiques telles que le mica, l'amiante et la fibre de verre sont également mises en œuvre, soit à l'état pur, soit agglomérées à l'aide de liants comme l'asphalte, la gomme-laque ou des résines synthétiques. Les développements contemporains en chimie ont permis l'introduction sur le marché d'une large gamme de produits synthétiques, spécifiquement conçus pour divers domaines d'application et pour résister à des températures d'utilisation variables. Les principaux matériaux isolants comprennent le polyvinyle, le polyuréthane, le nylon, les résines époxy et le polyester, chacun présentant des caractéristiques d'isolation thermique spécifiques. Pour garantir une durée de vie opérationnelle acceptable des isolants, leur utilisation est conditionnée par le respect de températures maximales de fonctionnement, catégorisées en quatre classes distinctes :

- **Classe A** : température maximale admissible de 105°C.
- **Classe B** : température maximale admissible de 130°C.
- **Classe F** : température maximale admissible de 155°C.
- **Classe H** : température maximale admissible de 180°C. [4]

## I.7 Les organes mécaniques

### I.7.1 La carcasse

La carcasse remplit une double fonction primordiale : elle constitue d'une part l'ossature structurelle de la machine, assurant le support mécanique de ses composants, et d'autre part, elle forme une enveloppe protectrice, garantissant l'intégrité des éléments internes vis-à-vis des sollicitations et des agressions de l'environnement extérieur . [8]



Figure I .6: La carcasse [33]

### I.7.2 L'arbre

L'arbre constitue l'organe de transmission mécanique. Il se compose d'une section centrale qui sert de support au corps du rotor et d'une extrémité sur laquelle est fixé un demi-accouplement. Il est généralement fabriqué en acier moulé ou forgé et son maintien en rotation est assuré par un ou plusieurs paliers. [8]



Figure I .7: L'arbre [33]



### **I.7.3 Paliers**

Leurs rôles est de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, ils sont constitués de. [1]

#### **I.7.3.a Roulements à billes**

Sont insérés à chaud sur l'arbre. Il assure le guidage en rotation de l'arbre. [1]



**Figure I .8: Roulements à billes [33]**

#### **I.7.3.b Flasques**

Ces éléments [par exemple, les flasques-paliers] remplissent une double fonction : d'une part, ils assurent le positionnement des paliers relativement à la carcasse et, d'autre part, ils garantissent la protection des organes internes de la machine. [9]



**Figure I .9: Flasques [33]**

#### **I.7.3.c Ventilateur**

Un ventilateur, positionné en extrémité d'arbre, est destiné à assurer le refroidissement de la machine. [10]



Figure I .10: Ventilateur [34]

## I.8 Utilisation

### I.8.1 Moteur asynchrone

Le moteur asynchrone est le moteur industriel par excellence, les moteurs asynchrones ont, pour leur grande majorité, un rotor à cage. Les progrès accomplis ces dernières années

Dans l'alimentation et la commande des machines n'ont fait que réduire la part des moteurs asynchrone à rotor bobiné par rapport à leurs homologues à cage d'écureuil. [11]

### I.8.2 Générateur asynchrone

Bien que son utilisation soit moins répandue que celle de l'alternateur, le générateur asynchrone trouve des applications spécifiques dans des installations de puissance limitée, telles que les microcentrales hydrauliques. Il détient néanmoins une part prépondérante du marché des éoliennes, où les machines à cage d'écureuil sont généralement privilégiées pour les puissances modestes, tandis que les machines à rotor bobiné sont mises en œuvre pour les installations de plus grande envergure. [11]

## I.9 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone repose intégralement sur les lois de l'induction électromagnétique. Elle est souvent assimilée à un transformateur à champ magnétique tournant, où le stator équivaut à l'enroulement primaire et le rotor, en court-circuit, à l'enroulement secondaire. Son opération est fondée sur l'interaction électromagnétique entre le champ tournant, créé par les courants triphasés fournis à l'enroulement statorique par le réseau d'alimentation, et les courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont balayés par ce champ tournant.

Lorsque le rotor tourne à une vitesse  $N$ , distincte de la vitesse de synchronisme ( $N_s$ ), l'application de la loi de Faraday à un enroulement rotorique démontre que celui-ci devient le

siège d'une force électromotrice. Cette force électromotrice, du fait du court-circuitage de l'enroulement, engendre un courant dont l'intensité est limitée par l'impédance de cet enroulement. L'interaction entre ce courant rotorique et le champ magnétique glissant (la composante du champ statorique vue par le rotor en rotation) génère des forces électromagnétiques s'exerçant sur les conducteurs (brins) du rotor. Le moment de ces forces par rapport à l'axe de rotation constitue le couple électromagnétique de la machine.

Lorsque le champ est de nature sinusoïdale, sa vitesse de rotation:  $N_s = \frac{2f}{p}$  en tr/s ou  $N_s = \frac{120f}{p}$  en tr/min

Où  $f$  : est la fréquence d'alimentation

$P$  : représente le nombre de pôles.

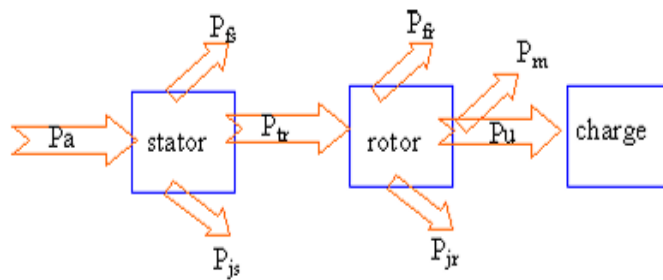
L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant  $N_s$  diffère de celle du rotor  $N_r$ , c'est à dire lorsque  $N_s \neq N_r$ , car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque  $N_s = N_r$ , le champ serait immobile par rapport au rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique. Le rapport  $g = \frac{N_s - N_r}{N_s}$  appelé glissement de la machine asynchrone. [12]

## I.10 Le glissement

Un décalage de vitesse de rotation est observé entre le champ magnétique tournant généré par le stator et la vitesse mécanique effective du rotor. Ce décalage est désigné par le terme « glissement ». C'est précisément cette absence de synchronisme qui justifie l'appellation de « moteur asynchrone » pour un moteur électrique fonctionnant sur le principe susmentionné. La différence entre la vitesse de synchronisme et la vitesse du rotor, constitutive du glissement, est conventionnellement exprimée en pourcentage de la vitesse de synchronisme. [13]

## I.11 Bilan de puissance

L'analyse du fonctionnement d'un moteur asynchrone débute par l'établissement rigoureux du bilan des puissances et l'identification des pertes inhérentes à la machine. Au cours du processus de conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique, une transmission de puissance par voie électromagnétique s'opère entre le stator et le rotor. Il en découle le bilan de puissances structuré comme suit :



**Figure I 11: Bilan de puissance [14]**

- La puissance électrique  $P_a$  absorbée est donné par :  $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$
- La puissance électromécanique Elle représente la puissance transmise au rotor par le champ tournant.  $P_e = P_a - p_{js} - p_{fer}$
- La puissance mécanique développée par le rotor est donné par :  $P_{mec} = P_e - p_{jr}$
- C'est la puissance transmise à la charge, on peut la déterminer en connaissant les pertes mécaniques. Elle est donné par :  $P_u = P_{mec} - p_m$

Le rendement du moteur asynchrone est donné par la relation suivante :  $\eta = \frac{P_u}{P_a}$

## I.12 Définitions et étapes de CAO

L'expression « Conception Assistée par Ordinateur » (CAO) fait l'objet d'un usage aujourd'hui si répandu, voire galvaudé, qu'elle tend à une certaine dépréciation sémantique. Si, pour un public non averti, cette désignation peut englober l'intégralité des applications informatiques intervenant dans le développement de produits techniques, les spécialistes et praticiens tendent à privilégier une nomenclature plus fine, telle que « X Assisté par Ordinateur » (XAO), où le terme « X » peut se référer spécifiquement au « dessin » (DAO), à la « fabrication » (FAO) ou à la « conception » au sens strict.

Par ailleurs, il serait réducteur de considérer que l'application des outils de CAO se limite au seul domaine de la conception des circuits électroniques intégrés. Une telle vision omettrait leur pertinence et leurs potentialités dans d'autres secteurs, notamment celui des machines électriques, dont les applications spécifiques de la CAO seront abordées subséquentment.

Un outil de CAO se définit fondamentalement comme un instrument de simulation numérique permettant la définition structurelle du dispositif à concevoir, son dimensionnement précis, ainsi que l'évaluation de ses performances en fonction de ses spécifications géométriques, constructives et des conditions opératoires envisagées. À partir d'un cahier des charges

spécifié, un tel outil offre la capacité d'explorer de manière systématique, voire automatisée, l'espace des solutions conceptuelles envisageables. [14]

## **I.13 CAO des machines électriques**

L'industrie électrique, dans la majeure partie de ses activités, se situe à la confluence de plusieurs disciplines complémentaires. Ainsi, une machine électrique, dont la fonction première est la conversion d'énergie entre les domaines électrique et mécanique, est le siège de phénomènes électromagnétiques et mécaniques (tels que les couples, les vibrations, les efforts électrodynamiques), mais également thermiques (notamment les échauffements résultant des pertes). Ces divers phénomènes doivent impérativement être appréhendés de manière simultanée lors du processus de conception de la machine.

De même, un convertisseur statique, architecturé autour de composants semi-conducteurs (thyristors, transistors, etc.), conjugue dans ses principes opératoires des notions avancées d'électrotechnique, d'électronique de puissance et de systèmes de commande. En conséquence, la conception d'une machine électrique implique une synthèse pluridisciplinaire intégrant les fonctions principales de la machine et les contraintes inhérentes aux aspects constructifs ou dimensionnels, ces derniers étant souvent dictés par les effets induits par la composante électromagnétique.

L'implémentation d'outils de conception assistée par ordinateur (CAO) en contexte industriel doit rigoureusement tenir compte de cette spécificité intrinsèque à la technologie des matériels et appareillages électriques. En effet, cette démarche fait appel à des concepts issus de la mécanique, de la représentation schématique, ainsi qu'à des outils spécialisés pour les machines électriques et l'électronique de puissance. L'avant-projet d'une nouvelle machine, l'étude d'une évolution significative d'un équipement existant, ou encore la conception d'un sous-ensemble, représentent la concrétisation matérielle du cahier des charges initial de l'étude et des diverses dispositions techniques adoptées. [14]

## **I.14 Présentation du logiciel ANSYS-Maxwell**

ANSYS Maxwell constitue un logiciel de simulation et d'analyse dédié aux phénomènes électromagnétiques. Il offre la capacité de modéliser et d'analyser les champs électromagnétiques, incluant les champs magnétiques, les champs électriques, les courants de Foucault, ainsi que les ondes électromagnétiques à haute fréquence. Ce logiciel s'appuie sur la méthode des éléments finis (MEF) pour représenter avec précision des géométries et des

matériaux complexes. Il propose en outre une gamme de solveurs permettant la modélisation de divers phénomènes électromagnétiques. [5]

Parmi les fonctionnalités principales d'ANSYS Maxwell, on dénombre :

- Des solveurs dédiés à la simulation des champs magnétiques, des champs électriques, des courants de Foucault, des circuits électriques et des ondes électromagnétiques.
- La capacité de modélisation bidimensionnelle (2D) et tridimensionnelle (3D) des champs électromagnétiques.
- La simulation des aspects de compatibilité électromagnétique (CEM) et d'interférences électromagnétiques (IEM).
- L'intégration avec d'autres outils de la suite ANSYS en vue de simulations multiphysiques.

ANSYS Maxwell est largement employé dans divers secteurs industriels, tels que l'aérospatiale, l'automobile, l'électronique et la défense, pour aborder des problématiques de conception et de validation de systèmes électromagnétiques complexes. [15]

## **I.15 Conclusion**

Ce chapitre a permis d'exposer de manière approfondie la structure et le principe de fonctionnement de la machine asynchrone. L'analyse détaillée des composants tels que le stator, le rotor (à cage d'écureuil ou bobiné) et les circuits magnétiques a illustré l'importance d'un dimensionnement rigoureux pour garantir le couple requis, le rendement optimal, la densité de puissance attendue et le respect des contraintes thermiques et géométriques. Nous avons rappelé que la création du champ magnétique tournant et l'effet de glissement du rotor sont au cœur du fonctionnement asynchrone. La conception assistée par ordinateur (C.A.O), notamment via la simulation numérique par éléments finis, a été présentée comme un outil essentiel pour modéliser ces phénomènes et optimiser les performances globales de la machine tout en réduisant le cycle de conception. Cette étude constitue une transition vers le chapitre suivant, dédié au calcul des dimensions principales du moteur asynchrone triphasé

***Chapitre II***  
***bobinage des machines électriques***

## II.1 Introduction:

Les enroulements des machines tournantes constituent le cœur du processus de conversion électromécanique, car ils génèrent le champ magnétique tournant indispensable au fonctionnement et déterminent la nature même de la machine. On distingue plusieurs catégories de bobinages statoriques : concentriques, imbriqués ou répartis (double couche favorisant l'atténuation des harmoniques) et ondulés (adaptés aux rotors bobinés) ; plus globalement, on parle d'enroulements distribués ou concentrés selon la répartition dans les encoches. La taille de ces enroulements est déterminée en fonction de plusieurs critères : le nombre de pôles, le pas d'enroulement, la classe thermique de l'isolation (A, B, F ou H), le taux de remplissage et l'équilibrage des phases pour limiter les déséquilibres de courant... On distingue en outre les systèmes monophasés, où un seul enroulement assure la conversion, et les systèmes triphasés, dans lesquels trois enroulements décalés de  $120^\circ$  sont couplés en étoile ou en triangle pour obtenir un champ tournant sinusoïdal idéal. Enfin, ce chapitre examine en détail les techniques de fabrication des spires (bobinage manuel, automatisé ou par barres), les méthodes d'isolation (films minces, vernis, résines) et les paramètres géométriques essentiels (nombre d'encoches, pas polaire, longueur active de la bobine), qui influent directement sur l'efficacité énergétique, les pertes thermiques et la durabilité des machines électriques.

## II.2 Enroulement des machines électriques

Le principe de fonctionnement des machines électriques repose sur l'interaction entre les champs magnétiques et les courants circulant dans les enroulements de la machine. La structure et les connexions des enroulements, ainsi que les courants et tensions qui les alimentent, déterminent les modes de fonctionnement et le type de machine électrique. Selon leurs différentes fonctions dans une machine électrique, les enroulements sont classés, par exemple, comme suit :

enroulements d'induit ;

enroulements de champ (magnétiseurs) ;

enroulements d'amortissement;

enroulements de commutation et

enroulements de compensation.

- Les enroulements d'induit, définis par la norme IEC 60050-411, sont des bobinages dans les machines synchrones, à courant continu ou à collecteur monophasé, permettant l'échange de puissance active (ou réactive pour les compensateurs synchrones) avec le



réseau électrique. L'« effet d'induit » désigne l'influence du champ magnétique généré par le courant d'induit. Contrairement aux machines synchrones, le stator des machines asynchrones n'est pas qualifié d'induit selon la norme IEC, bien qu'il assure à la fois l'aimantation et l'induction de tension. Le rotor asynchrone ne consomme qu'une puissance dissipative (liée au glissement), tandis que l'induit des machines à courant continu est situé au rotor pour transférer la puissance.

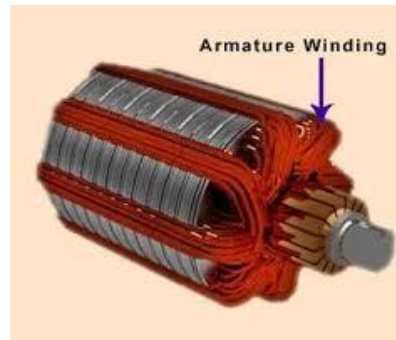


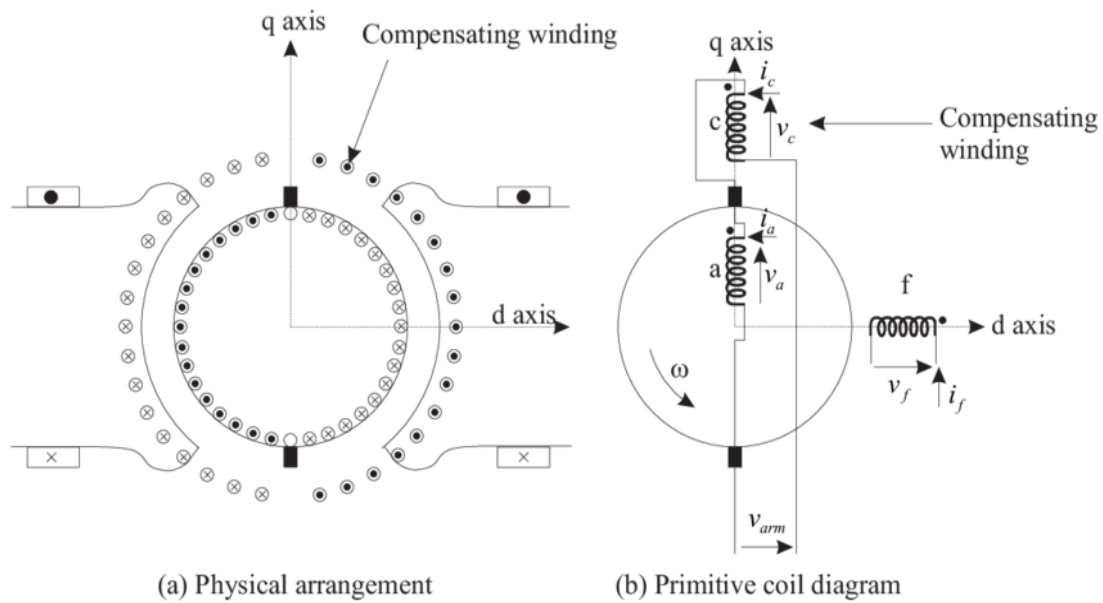
Figure II.1: enroulements d'induit [35]

- Les enroulements d'excitation créent le champ magnétique nécessaire. Certaines machines, comme les machines à réluctance, combinent les fonctions d'induit et d'excitation.

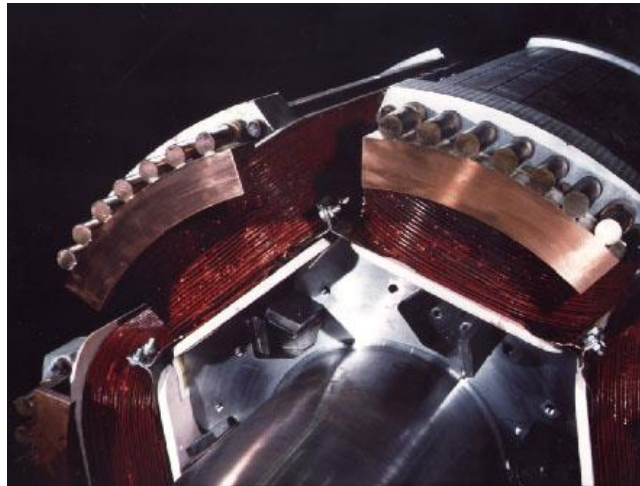


Figure II.2: enroulements de champ (magnétiseurs) [36]

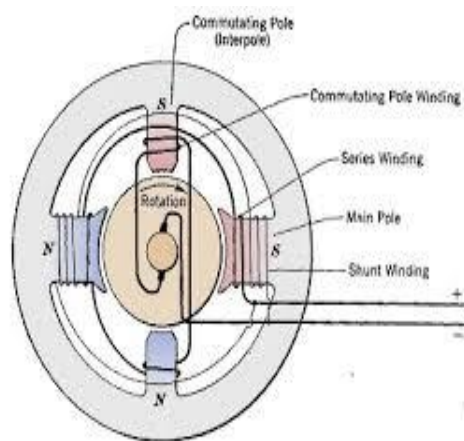
- Les enroulements de compensation (machines à courant continu) et les amortisseurs (machines synchrones) corrigent les effets indésirables comme la réaction d'induit ou les oscillations.



**Figure II3:** enroulements de compensation [35]



FigureII. 4: enroulements d'amortissement [37]



FigureII.5: enroulements de commutation[40]

- Les bobinages se classent en trois catégories géométriques :
  - Enroulements polyphasés (encoche, pour les induits AC ou l'excitation des machines synchrones non saillantes).
  - Enroulements à pôles saillants (généralement des bobinages concentrés d'excitation, parfois utilisés comme induits).
  - Enroulements à collecteur (circuits fermés connectés via un collecteur, spécifiques aux machines à courant continu ou AC à collecteur).
  - Enfin, les bobinages sont globalement divisés en deux types : les bobinages distribués et les bobinages concentrés, sont applicables aussi bien en courant continu qu'en courant alternatif.
- [16]



## II.4.2 Bobinage par barres

Lorsque  $n_b = 1$ , on parle de bobinage par barres. Le conducteur prend généralement la forme d'une barre de section rectangulaire. Cette barre peut elle-même être constituée de plusieurs éléments plats, connectés en parallèle. On conserve ici la désignation de « faisceaux » pour les portions de la barre situées dans les encoches. Toutefois, il n'est plus possible de distinguer des « têtes de bobines » distinctes des connexions entre les barres. [17]

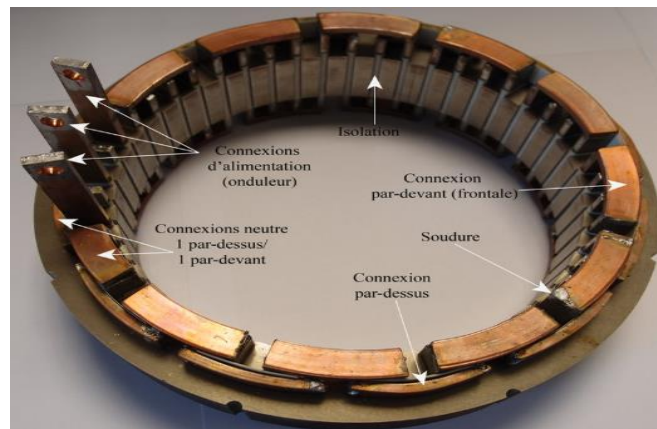


Figure II 7: Bobinage par barres [39]

## II.5 Différents types d'enroulements triphasés

### II.5.1 Enroulement triphasé à une couche :

Pour les machines de faible ou moyenne puissance et les grosses machines à nombre de pôles élevé. On utilise des enroulements à une seule couche de bobine ou de section par encoche ce qui caractérise essentiellement un tel bobinage c'est le nombre d'encoche par pôles et par phase "q". Il permet en effet de placer les cotes des bobines ou des sections en précisant à quelle phase ils appartiennent et dans passent les courant.

On précise comment sont connectés les faisceaux allé et les faisceaux retour d'une phase en indiquant si le bobinage est en bobines ou en sections et par pole ou par pôles conséquent. L'enroulement est en bobines si on utilise plusieurs bobines concentriques pour réaliser le bobinage d'une phase correspondent à une distance polaire simple et double, les bobines élémentaires sont réalisées sur de gabarits différent.

L'enroulement en section utilise des éléments identiques, le bobinage d'une phase est formé de section décalée.

L'enroulement est par pôles si chaque phase compte une bobine ou un groupe de section et par pôles conséquent, si chaque phase compte une bobine ou un groupe de sections par paire de pôles ,[18]

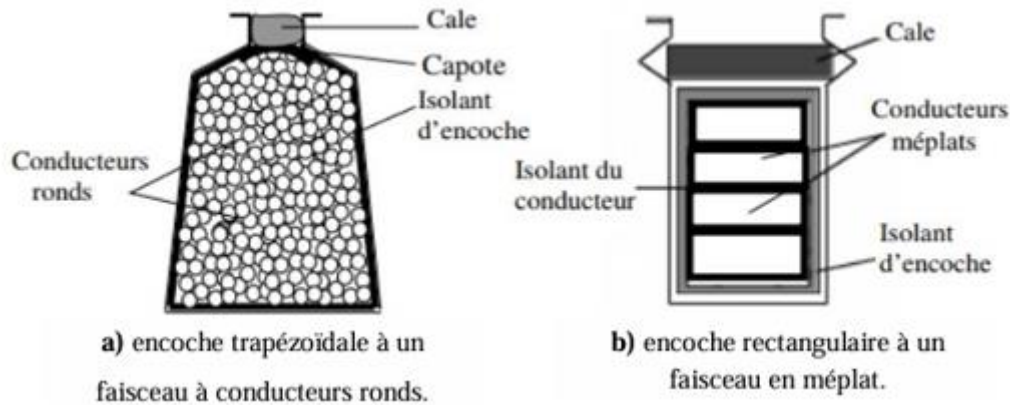
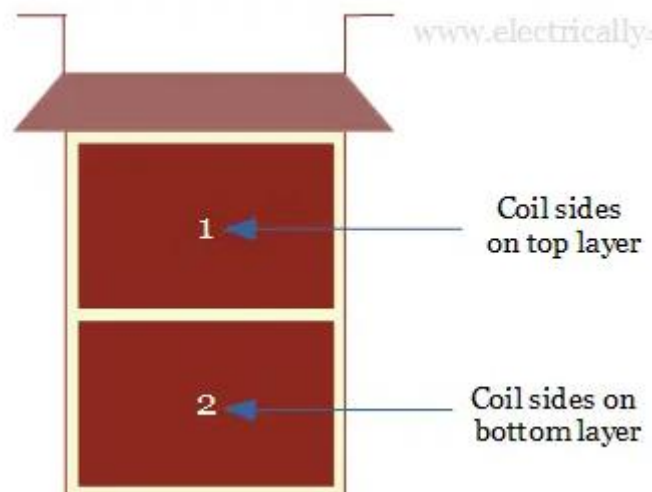


Figure II 8: à une couche [18]

### II.5.2 Enroulement triphasé à deux couches :

L'enroulement à deux faisceaux par encoche n'est utilisé qu'avec des sections. On trouve donc deux côtes, de section par encoche comme dans les machines à courant continu. Le premier avantage est que les têtes des sections forment un ensemble très régulier, il est plus facile à fretter s'il s'agit d'un armateur tournant (cas des moteurs asynchrones à rotor bobiné) ; plus facile à brider (cas du stator de toute les machines de forte ou très forte puissance ou des efforts considérables peuvent s'exercer sur les développantes, en cas de court-circuit notamment. Le second avantage est la possibilité de former des sections à pas raccourci et de réduire ainsi certaine harmonique.[18]



FigureII 9: à deux couche [22]

### II.5.3 Enroulement par pôles conséquent :

Dans un enroulement par pôle conséquent, le nombre de groupes de bobines dans une phase est égal à  $p$ . Chaque groupe de bobines crée une paire de pôles pour former des branches parallèles. Il faut s'assurer de l'égalité des résistances dans toutes les branches parallèles des trois phases, dans le cas contraire, tous les groupes de bobines de chaque phase sont reliés en série ( $a=1$ ). Dans le but de s'accommoder avec la méthode de représentation de l'enroulement ; et pour une première fois, on représente les encoches. Considérons un exemple très simple d'enroulement ayant comme paramètres.[19]

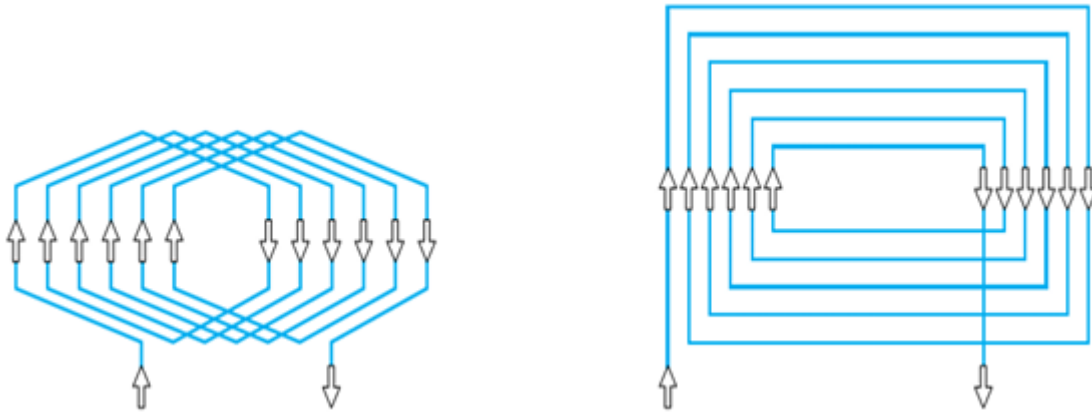


Figure II 10: Enroulement par pôles conséquent [41]

### II.5.4 Enroulement par pôles :

Pour concevoir un enroulement par pôle il faut obligatoirement que le nombre d'encoches par pôle et par phase soit supérieur à l'unité ( $q > 1$ ), si cette condition est vérifiée, on divise les groupes de bobines en demi-groupes ; c'est-à-dire qu'on doit concevoir l'enroulement avec  $q = q/2$ . Un tel enroulement a toujours un pas raccourci  $y < \dots$ , ce qui permet de diminuer les dimensions des groupes de bobines et par conséquent de réduire le poids du cuivre utilisé. Il est utilisé dans les machines électriques de faible puissance. Le nombre de groupes de bobines dans une phase pour ce type d'enroulement est égal à  $2P$ . Considérons un exemple très simple d'enroulement ayant comme paramètres.[19]

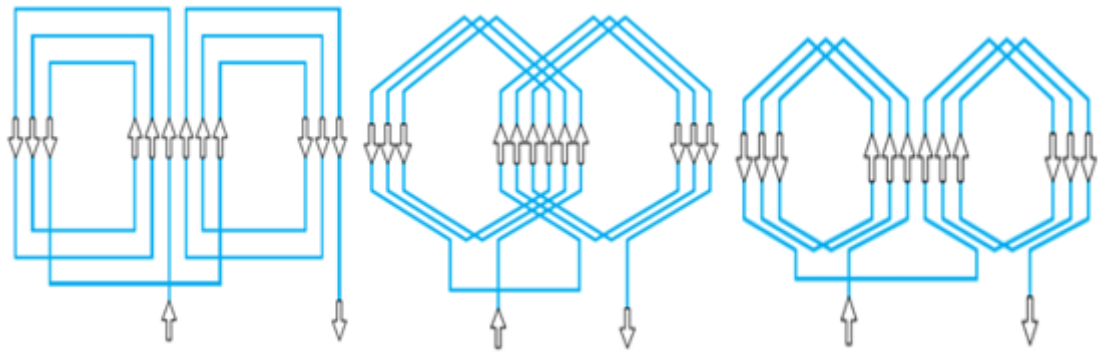


Figure II 11: Enroulement par pôles [41]

### II.5.5 Les enroulements réguliers

Ceux-ci doivent répondre dans les conditions suivantes :

- Le pas d'enroulement du bobinage doit être diamétral (pas d'enroulement = pas polaire) ;
- Le nombre d'encoches par pôles et par phase  $q$  doit être un nombre entier (pair ou impair )
- L'écart angulaire entre phases  $\theta$  doit être égal à  $2\pi / m$
- $m$  : nombre de phases.[20]

### II.5.6 Enroulements semi – réguliers :

Ceux-ci ne répondent pas complètement aux conditions d'un enroulement régulier, sauf en ce qui concerne l'écart angulaire entre phases.

Les bobinages semi-réguliers peuvent comprendre :

- Un pas diamétral ou un pas raccourci et  $q$  fractionnaire ;
- Un pas raccourci et  $q$  entier (pair ou impair) ..[20]

### II.5.7 Les enroulements irréguliers

- Ces enroulements présentent un écart angulaire entre phases  $\theta$  qui n'est rigoureusement égal à  $2\pi / m$  [20]

## II.6 Bobinag :

selon ma méthode de réalisation du bobinage, on peut en distinguer deux catégories :

le bobinage distribué (réparti) fig 11 et le bobinage concentré fig 12.[21]

### II.6.1 Bobinage concentré



Le bobinage concentré, plus ancien, consiste à enrouler chaque dent individuellement puis à relier les bobines d'une même phase en série ou en parallèle. Cette configuration présente plusieurs avantages par rapport au bobinage distribué :

- Réduction significative des têtes de bobines (diminution du volume de cuivre)
- Mise en œuvre plus simple
- Rendement égal ou supérieur pour un couple donné

Grâce à sa compacité et à son efficacité, le bobinage concentré est particulièrement adapté aux machines de forte puissance..[21]



**Figure II 12: bobinage concentré [38]**

### **II.6.2 Bobinage distribué**

Le bobinage distribué est la technique la plus répandue en industrie. Son atout majeur réside dans la répartition quasi-sinusoïdale du champ magnétique dans l'entrefer, ce qui améliore la capacité du stator à récupérer le flux rotorique et réduit les fuites de flux. De plus, il est particulièrement recommandé pour les applications à grande vitesse, où le nombre de paires de pôles doit être faible.

En revanche, son principal inconvénient est l'importante quantité de cuivre requise, surtout au niveau des têtes de bobines, ce qui alourdit et complexifie le montage. [21]



Figure II 13: bobinage distribué [37]

## II.7 types de bobinage distribué

### II.7.1 Bobinage imbriqué

Dans le bobinage imbriqué, l'extrémité de terminaison d'une bobine est reliée au début de la bobine adjacente située sous le même pôle. Cette superposition des bobines successives justifie l'appellation de « bobinage imbriqué ». Le schéma ci-dessous illustre cette configuration. [22]

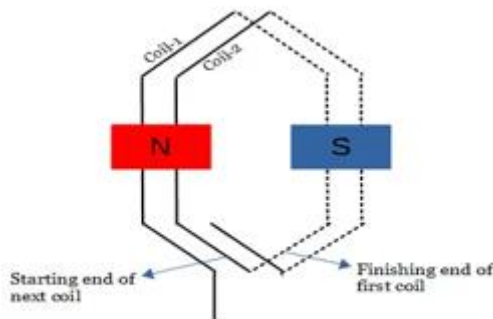


Figure II 14: bobinage imbriqué [22]

### II.7.2 Bobinage ondulé

Dans le bobinage ondulé, le côté de la bobine n'est pas connecté en arrière, mais progresse vers l'avant jusqu'à un autre côté de la bobine. Chaque côté de la bobine traverse chaque pôle N et pôle S jusqu'à son point de départ. L'enroulement est disposé de manière à progresser dans la même direction. Sa structure ondulée lui confère une forme ondulée, d'où son nom d'enroulement ondulé. On l'appelle également enroulement série, car il forme une série de bobines. [22]

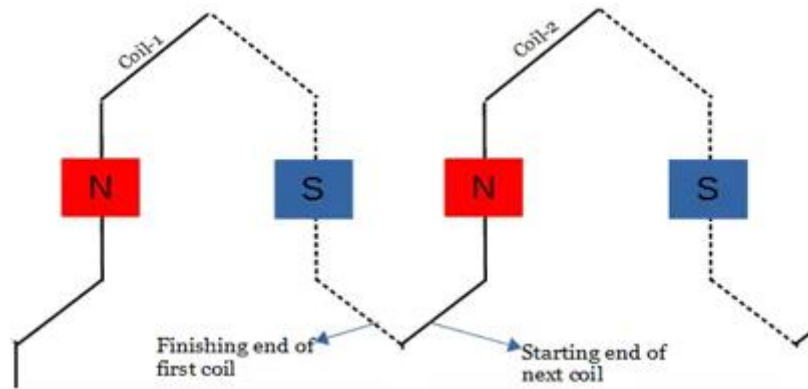


Figure II 15: bobinage ondulé [22]

### II.7.3 d'enroulement rétrograde et progressif

Lorsque le pas arrière est supérieur au pas avant, l'enroulement progresse de la gauche vers la droite et est appelé **enroulement imbriqué progressif**

Lorsque le pas avant est supérieur au pas arrière, l'enroulement progresse de la droite vers la gauche. Un tel enroulement est appelé **enroulement imbriqué rétrograde**

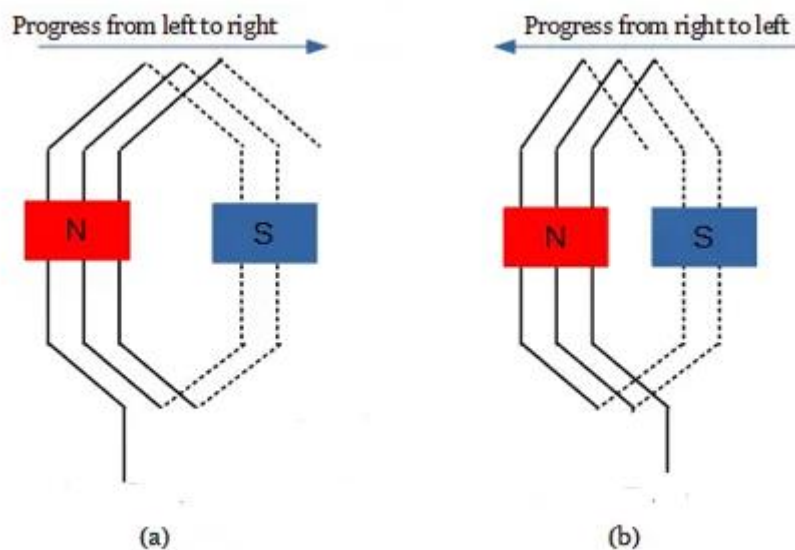


Figure II 16: (a) enroulement imbriqué progressif (b) enroulement imbriqué rétrograde [22]

Si, après avoir effectué un tour complet de l'induit, l'enroulement tombe dans une entaille située à droite de son point de départ, on parle alors d'**enroulement ondulé progressif**. En revanche, s'il tombe dans une entaille située à gauche de son point de départ, on parle d'**enroulement ondulé rétrograde**. [22]

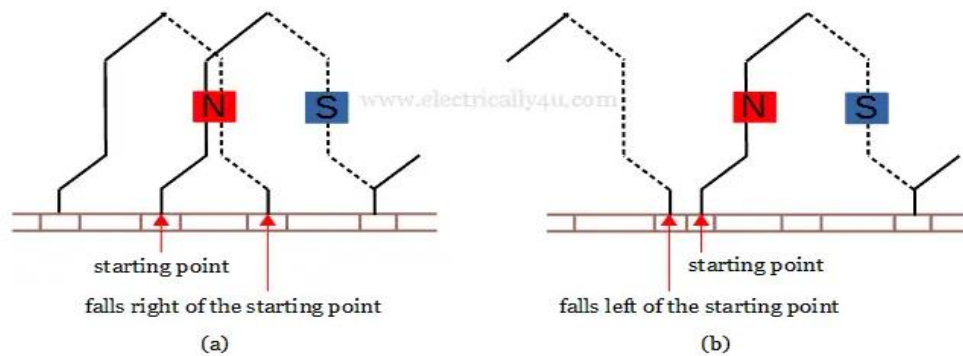


Figure II 17: (a) enroulement ondulé progressif (b) enroulement ondulé rétrograde [22]

## II.8 les pas des sections ou des bobines

### II.8.1 Le pas diamétral.

un pas d'enroulement égal à la longueur du pas polaire. Il équivaut à la distance périphérique comprise entre deux lignes neutres consécutives  $Y = \tau_p$ . [23]

### II.8.2 Le pas raccourci

un enroulement à pas inférieur au pas polaire  $Y < \tau_p$ . [23]

### II.8.3 Le pas allongé

un pas d'enroulement supérieur à la longueur du pas polaire  $Y > \tau_p + 1$ . [23]

## II.9 Coefficient de bobinage $k_b$ :

Ce coefficient est nécessaire pour le calcul du flux inducteur dans les machines à courant alternatif,  $k_b$  doit être toujours inférieur à 1 ( $k_b < 1$ ).  $k_b = 1$  si tous les conducteurs d'un pôle étaient logés dans une seule encoche, il sera plus faible lorsque le nombre d'encoches par pôle et par phase est plus grand. [24]

## II.10 Conditions de réalisation d'un bobinage triphasé

- Les trois phases sont décalées de  $120^\circ$  électriques.
  - Si le nombre de pôles  $p$  est un multiple de  $3^n$ , le nombre d'encoches doit être un multiple de  $3^{n+1}$
  - Lorsque  $q$  n'est pas entier, on a :  $q = \lambda + \beta/\delta$   
Où  $\lambda$  est un entier et  $\beta/\delta$  une fraction irréductible, et  $\lambda$  ne doit pas être un multiple de 3.
- Pour obtenir un schéma équilibré (c'est-à-dire sans courant de circulation entre les parties parallèles d'une même phase), les forces électromotrices (FEM) induites dans chaque partie doivent être égales en module et en phase, d'où :
- $S$  doit être divisible par  $3a$ .

- La valeur maximale de  $a$  est  $2p$

Pour établir un schéma de bobinage, les étapes suivantes doivent être suivies :

- Répartir les faisceaux entre les trois phases.
- Définir le sens de parcours de chaque faisceau dans sa phase correspondante.
- Assembler les faisceaux pour former les bobines.
- Déterminer les connexions entre bobines au sein de chaque phase, ainsi que les entrées et sorties permettant les couplages classiques en triangle ou en étoile. [25]

### **II.11 Choix des enroulements pour courant alternatif :**

Aucune règle ne peut être donnée quant au choix du type de bobinage, celui-ci dépendant de nombreux facteurs tels que :

Possibilité de mise en parallèles à l'intérieur des phases, principalement pour les bobinages susceptibles d'être réalisés pour des tensions différentes.

- Encombrement des têtes de bobines et facilité de fixation de celles-ci.
- Temps nécessaire pour réaliser le bobinage.
- Outillage nécessaire pour la fabrication des bobines.
- Possibilité de couper l'induit en plusieurs parties à assembler sur place

Les bobinages à plans à un faisceau par encoche étaient autrefois très répandus, principalement pour les faibles et moyennes puissances. Ils sont encore souvent utilisés pour les moteurs monophasés. Pour les bobinages triphasés, on emploie de plus en plus les bobinages à deux faisceaux par encoche car ils présentent les avantages :

- Possibilité de réduction du pas de bobinage
- Fixation plus homogène des têtes de bobines
- Nécessité d'un seul moule de bobines. [25]

### **II.12 Rappel sur les paramètres géométriques des enroulements :**

L'enroulement dans toutes les machines électriques et la pièce maîtresse nécessaire pour la création de champ électromagnétique.

Tout l'enroulement électrique est défini par les paramètres suivants :

$N_e$  : nombre d'encoche

$P$  : nombre de pôles

$m$  : nombre de phase

$q$  : nombre d'encoche par pôle et par phase, défini par la formule suivante :  $q = \frac{N_e}{p \times m}$

$a$  : nombre de groupes en parallèles par phase.

$\tau_p$  : pas polaire en nombre d'encoches  $\tau_p = \frac{Ne}{p}$

Y : pas d'enroulement

$\alpha$  à l'angle électrique entre deux encoches voisines

|                                              | Bobinage à<br>poles<br>cocséquents | Bobinage à<br>poles<br>Alternés  |                  |
|----------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------|
| Pas polaire                                  | $\tau_p$                           | $T_p$                            | 9                |
| pas d'enroulement                            | Y                                  | Y                                | 8                |
| Pas de pahse                                 | $120/\alpha$                       | $120/\alpha$                     | 6                |
| nombre des groupes de bobine<br>par phase    | $p/2$                              | p                                | 4                |
| nombre des bobines par groupe                | q (1faisceau)<br>2q (2faisceau)    | q/2 (1faisceau)<br>q (2faisceau) | 3 (2faisceau)    |
| nombre de groupes en parallèles<br>par phase | a                                  | a                                | 1                |
| Decalage entre deux groupes                  | $2\tau_p$                          | $\tau_p$                         | 9                |
| Liaison entre deux groupes                   | Sorties-entrées                    | Sorties- sorties                 | Sorties- sorties |

Nous avons choisi bobinage imbrique a pole alternes à pas raccourci deux faisceau

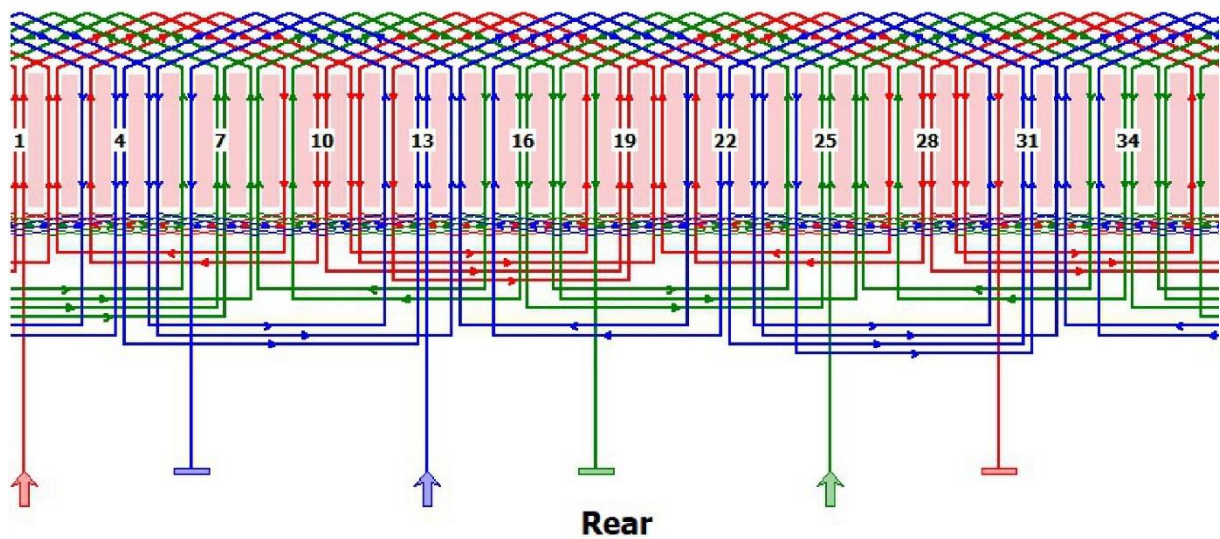


Figure II 18: schema de bobinage

## II.13 Conclusion

Ce chapitre a mis en lumière le rôle fondamental des enroulements dans le fonctionnement et la performance des machines électriques tournantes. Après avoir défini leur importance pour la génération du champ magnétique tournant, nous avons présenté les principales familles de bobinages concentriques, imbriqués, ondulés, répartis et concentrés et leurs spécificités géométriques, ainsi que les variantes monophasées et triphasées adaptées aux différentes exigences industrielles. L'étude du dimensionnement a souligné l'influence cruciale de la connexion (étoile ou triangle), du nombre de pôles, du pas d'enroulement, de la classe thermique de l'isolation et de l'équilibrage des phases sur le rendement, la densité de puissance et la tenue aux surcharges. Les techniques de réalisation, qu'elles soient manuelles, mécanisées ou par barres, ont été comparées en termes de précision et de coût, tandis que les méthodes d'isolation ont été évaluées pour leur impact sur la fiabilité et la longévité. Enfin, les critères géométriques nombre des encoches, longueur active des spires, taux de remplissage ont été examinés pour leur rôle dans la réduction des pertes et l'amélioration de la compacité. Cette synthèse prépare désormais le terrain au chapitre suivant

***Chapitre III***  
***Les calcule preliminaire***



### **III.1 Introduction :**

La conception d'une machine électrique, notamment d'un moteur asynchrone, repose sur une série de calculs préliminaires essentiels. Ces calculs constituent la structure technique de base permettant de déterminer les dimensions, les performances, la fiabilité et l'efficacité énergétique de la machine. Dans ce chapitre, nous abordons les étapes fondamentales du dimensionnement, en tenant compte des normes techniques, des paramètres magnétiques et électriques, ainsi que des contraintes géométriques qui influencent directement la qualité finale du design.

Les aspects principaux traités comprennent le choix de la charge magnétique spécifique ( $B_{av}$ ) et de la charge électrique spécifique ( $a_c$ ), la vérification des dimensions selon les normes (comme la vitesse périphérique et l'épaisseur de l'entrefer), ainsi que les calculs détaillés relatifs au stator, à l'entrefer et au rotor. À travers une approche méthodique, nous exposons les équations de puissance, les coefficients de bobinage, les paramètres d'induction et les dimensions des encoches, en nous appuyant sur des références techniques reconnues.

Ce chapitre a pour objectif de fournir une base rigoureuse pour les étapes suivantes de simulation et de validation, tout en mettant en évidence les compromis techniques à considérer dans le choix des paramètres de conception (performance, facteur de puissance, pertes, capacité de surcharge, etc)

### **III.2 Les normes techniques adoptées dans le calcul :**

#### **III.2.1 choix de la charge magnétique spécifique, ' $B_e$ ' :**

La valeur de  $B_{av}$  influence directement plusieurs facteurs

##### **III.2.1.a Pert fer :**

La perte dans le fer est constituée de deux composantes : la perte par 'hystérésis' et la perte par 'courants de Foucault'

Dans les moteurs électriques, le champ magnétique change continuellement, et le circuit magnétique contient de petites particules magnétiques appelées domaines magnétiques

Lorsque le champ magnétique change, ces petits domaines magnétiques tournent et s'alignent avec le nouveau champ.

Mais le problème, c'est que faire tourner ces domaines à l'intérieur du fer nécessite de l'énergie.

Et puisque le champ change constamment (comme c'est le cas à chaque cycle du courant alternatif), on perd de l'énergie à chaque fois que ces domaines tournent.

Donc, plus le champ change rapidement, plus  $B_e$  la perte d'énergie augmente [28]

### III.2.1.b Courant de magnétisation :

C'est le courant qui circule dans les enroulements du moteur et qui est utilisé pour magnétiser le noyau en fer du moteur.

De manière générale, plus ce courant augmente, plus le champ magnétique à l'intérieur du moteur devient fort.

Plus la valeur de  $B_e$  augmente, plus la densité du flux magnétique augmente, ce qui signifie qu'il y a un champ magnétique plus fort dans le noyau en fer.

Pour augmenter le magnétisme dans le moteur, le courant d'excitation doit être plus élevé afin de pouvoir créer cette densité de flux magnétique élevée.[28]

"Comment cela affecte-t-il le facteur de puissance ? C'est une mesure de l'efficacité de l'utilisation de l'énergie dans le moteur. Lorsque le courant d'excitation est plus élevé, cela signifie que le moteur consomme une puissance réactive, car ce courant ne fait pas partie de l'énergie utilisée pour le travail réel. Cela entraîne une baisse du facteur de puissance, ce qui signifie que le moteur utilise plus d'énergie électrique sans en tirer pleinement profit

$$P = U \cdot I \cdot \cos\phi \quad ; \quad I = \frac{P}{U \cdot \cos\phi} \quad ; \quad U = \text{cste} \quad \text{et} \quad \cos\phi = \text{variable}$$

**P**:puissance actif

**Q** :puissance réactif

**S** :puissance apparente

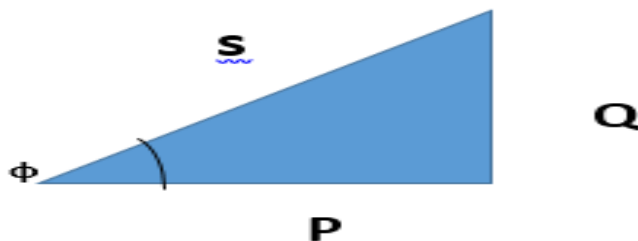


Figure III 1: bilan de puissance triangulaire

C'est l'énergie réactive qui a fait baisser le facteur de puissance à mesure que  $\phi$  augmentait en raison de l'augmentation de Q le facteur de puissance a diminué

### III.2.1.c Capacité de surcharge :

c'est la capacité du moteur à fonctionner sous des charges supérieures à la charge nominale pendant une courte période sans subir de défaillance.

Lorsque la valeur de  $B_e$  est élevée, il devient possible d'obtenir la tension requise  $f_{em}$  avec un nombre réduit de spires par phase.

Pourquoi ?

Parce que le flux magnétique est un élément essentiel dans la génération de la tension. Donc, plus le flux magnétique augmente, moins on a besoin de spires pour compenser et produire la même tension.

La réduction du nombre de spires entraîne une diminution de la réactance, car celle-ci est proportionnelle à la longueur et à la distance du fil.

Lorsque la réactance diminue, le moteur devient plus capable de gérer les surcharges sans une chute importante de la tension ni une augmentation excessive du courant.

$B_e$  faible  $\rightarrow$  bon facteur de puissance, faibles pertes fer, faible capacité de surcharge

$B_e$  élevé  $\rightarrow$  faible facteur de puissance, pertes fer élevées, bonne capacité de surcharge [28]

#### III.2.1.d Choix de la charge électrique spécifique ' $a_c$ ' :

Le choix du chargement électrique spécifique, «  $a_c$  », influence directement plusieurs facteurs comme indiqué.[28]

#### III.2.1.e Élévation de température :

Une valeur élevée du chargement électrique spécifique ( $a_c$ ) entraîne une augmentation des pertes cuivre dans l'induit, ce qui provoque une élévation de température plus importante.[28]

#### III.2.1.f Capacité de surcharge :

Une valeur plus grande de  $a_c$  augmente le nombre de spires par phase, ce qui accroît la réactance de fuite et réduit ainsi la capacité de la machine à supporter les surcharges.[28]

#### III.2.1.g Tension nominale :

Pour les moteurs à haute tension, l'espace requis pour l'isolation est plus important, ce qui réduit le facteur de remplissage des encoches. Si une valeur élevée de  $a_c$  est choisie, un diamètre d'induit plus grand sera nécessaire, augmentant ainsi la taille globale du moteur.

La valeur de  $a_c$  varie généralement entre 5000 et 45000 ampères-conducteurs par mètre, selon la puissance de la machine.[28]

$$a_c = \frac{3 \cdot I_s \cdot Z}{\pi \cdot D}$$

Plus la valeur des ampères-conducteurs par mètre (AC) augmente, plus le nombre de spires nécessaire est élevé. Ce qui entraîne une augmentation de la résistance. Cela entraîne une

augmentation des pertes de cuivre.  $R = \rho \times \frac{L_b}{a_b}$

$$P_{cui} = R \times I_s^2 \quad [5]$$

### **III.2.1.h Vérification des dimensions :**

Pour vérifier la précision des dimensions et leur conformité aux normes établies, on distingue plusieurs méthodes.

#### **III.2.1.i Vitesse périphérique :**

La valeur calculée du diamètre "D" doit donner une vitesse périphérique inférieure à 30 m/s, et elle est calculée comme suit :  $v_s = \pi * D * n_s$

Il faut recalculer le diamètre "D" ou recommander une construction spéciale du rotor si la vitesse périphérique dépasse 30 m/s. [28]

#### **III.2.1.j Epaisseur de l'entrefer :**

L'entrefer ne dépasse pas la valeur 0,6 mm

#### **III.2.1.k Certaines normes recommandées dans la conception :**

Lorsque la longueur du noyau "L" dépasse 16 à 18 cm, le refroidissement de la machine devient très difficile.

C'est pourquoi des conduits de ventilation radiaux d'un diamètre compris entre 8 et 10 mm sont utilisés.

Dans ce cas, la longueur totale du noyau est déterminée comme suit :  $L_T = L - n_d * w_d$

où " $n_d$ " est le nombre de conduits, et " $w_d$ " est la largeur de chaque conduit

### **III.2.2 Les calculs de conception :**

Les calculs de conception des moteurs asynchrones sont basés sur trois parties principales : stator, entrefer et rotor.

#### **III.2.2.a stator :**

#### **III.2.2.b Équation de la puissance utile d'un moteur asynchrone triphasé :**

La conception du moteur asynchrone nécessite la détermination des dimensions géométriques principales, telles que le diamètre extérieur et la longueur axiale. Cela se fait en se basant sur l'équation de la puissance utile, qui constitue la base pour définir ces dimensions en fonction des exigences de performance.

$$P_u = 3 \times V_{ph} \times I_{ph} \times \eta \times \cos \varphi \times 10^{-3}$$

$$V_{ph} = 4.44 \times f \times \varphi \times T_s \times K_w$$

$$f = \frac{pN}{120} \quad ; \quad f = \frac{p}{2} \times n_s \quad \text{avec} \quad n = \frac{N}{60} \quad [28]$$

### III.2.2.c le flux dans l'entrefer :

Le flux dans l'entrefer n'a qu'une composante radiale, il peut être exprimé comme étant le produit entre l'induction moyenne  $B$  dans l'entrefer et la section normale à sa direction sous un pôle :

$$\varphi = B \times S \quad ; \quad \varphi = B_e \times \tau_p \times L \quad ; \quad \varphi = \frac{B_e \times \pi \times D \times L}{p} \quad [28]$$

### III.2.2.d Coefficient de bobinage $K_w$ :

Il est utilisé dans le calcul de la tension induite à l'intérieur du moteur. Lorsqu'on enroule les fils, on les répartit sur plusieurs encoches en leur faisant occuper un certain angle. Cette disposition n'est pas parfaite à 100 %, c'est-à-dire que la tension ne prend pas la forme d'une fonction sinusoïdale précise. Le coefficient de distribution (ou facteur d'enroulement) sert alors à compenser cette imperfection.

$$K_w = K_d \times K_r \quad [29]$$

### III.2.2.e Coefficient de distribution $K_d$ :

L'expression de facteur de distribution est donnée par [29]

$$K_d = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \times m}\right)}{q \times \sin\left(\frac{\pi}{2 \times m \times q}\right)}$$

L'expression de ce coefficient de raccourcissement est donnée par [29]

$$K_r = \sin\left(\beta \times \frac{\pi}{2}\right)$$

### III.2.2.f Calculs des dimensions principaux :

On a  $ac = \frac{3 \times I_s \times Z}{\pi \times D}$

Puisqu'une seule spire est formée par un conducteur aller et un autre retour, alors

$$Z_{ph} = 2 \times T_{ph}$$

$$a_c = \frac{3 \times 2 \times I_{ph} \times T_{ph}}{\pi \times D} \quad ; \quad T_{ph} \times I_{ph} = \frac{\pi \times D \times a_c}{2 \times 3}$$

Extraction de l'équation de la puissance de sortie avec ses valeurs et les paramètres de conception :

$$P_u = 1.11 \times n_s \times B_e \times \pi^2 \times D^2 \times L \times ac \times k_w \times \eta \times \cos\varphi \times 10^{-3}$$

$$P_u = C_0 \times D^2 \times L \times n_s$$

### III.2.2.g la volume de la machine :

$$D^2 \times L = \frac{P_u}{C_0 \times n_s} \quad [1]$$

Plus les valeurs du coefficient de sortie  $C_0$  et de la vitesse synchrone ( $n$ ) sont élevées, plus le volume de la machine  $D^2 \times L$  diminue, ce qui réduit ainsi sa taille globale. Étant donné que la vitesse synchrone est généralement spécifiée, le choix d'une valeur élevée de  $C_0$  permet de minimiser les dimensions de la machine. Puisque  $C_0$  est directement proportionnel à la charge magnétique spécifique ( $B_{av}$ ) et à la charge électrique spécifique ( $a_c$ ), l'augmentation de ces deux paramètres permet de réduire la taille et le coût de la machine. Toutefois, l'utilisation de valeurs trop élevées de  $B_{av}$  et  $a_c$  peut entraîner des effets négatifs, tels qu'une augmentation des pertes, une baisse du rendement, une détérioration du facteur de puissance, et une élévation excessive de la température.

### III.2.2.h Le pas polaire $\tau_p$ :

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

$$\tau_p = \frac{\pi \times D}{p}$$

### III.2.2.i La séparation du produit $D^2 \times L$

La séparation du produit  $D^2 \times L$  dépend du rapport le coefficient géométrique  $\lambda = \frac{L}{\tau}$

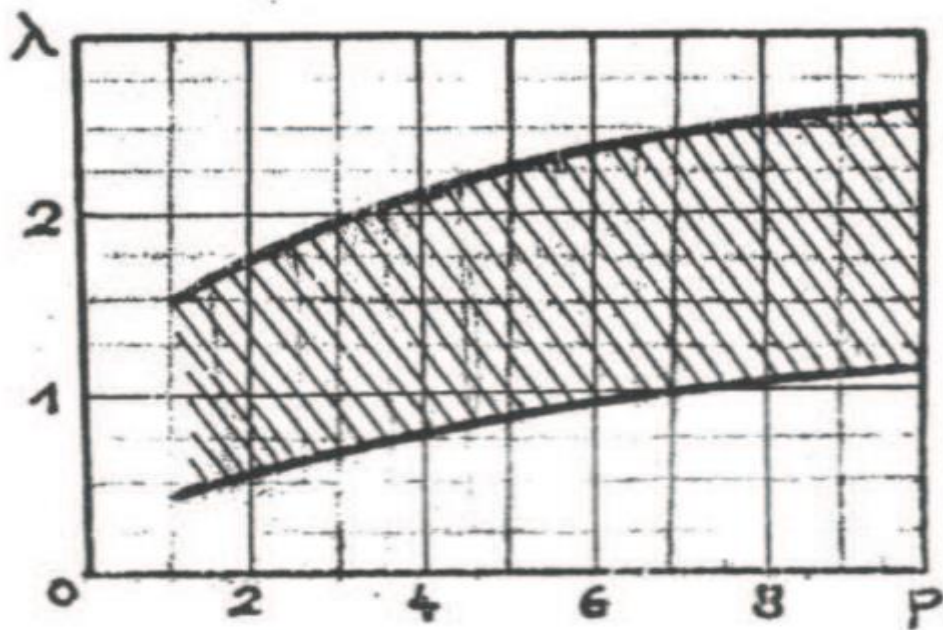


Figure III 2: courbe variation de coefficient géométrique  $\lambda$  en fonction nombre de pôle p

Le tableau montre les différentes valeurs du rapport  $L/\tau$  généralement utilisées, en fonction des caractéristiques de conception de la machine.

| caractéristique de conception     | $L/\tau$         |
|-----------------------------------|------------------|
| <b>Coût minimum</b>               | <b>1.5 to 2</b>  |
| <b>Bonne rendement</b>            | <b>1.5</b>       |
| <b>Bonne facteur de puissance</b> | <b>1 to 1.25</b> |
| Bonne design global               | 1                |

### III.2.2.j Calculer le diamètre d'alissage de stator D :

Pour quelque soit de valeur  $\lambda$

$$D^3 = \frac{P \times D^2 \times L}{\lambda \times \pi} \quad [1]$$

### III.2.2.k Calculer la longueur de machine L :

$$L = \frac{\lambda \times \pi \times D}{p}$$

### III.2.2.l Longueur active de la machine :

Le circuit magnétique est constitué par une série de paquets de tôles séparés par des espaces d'air ou canaux de ventilation dont la largeur varie entre 8 et 12 mm. , laissant passer l'air de refroidissement. La machine est évidemment d'autant mieux ventilée que le nombre de canaux de ventilation est plus grand. De ce fait, la longueur active de la machine vaut :

$$L_I = k_f \times L - l_{vt} \times n_{vt}$$

### III.2.2.m enroulement du stator :

Étant donné que le modèle sélectionné dans le logiciel Maxwell est connecté en étoile (connexion en étoile), nous adopterons le même type de connexion dans notre étude afin de garantir la compatibilité et la précision des résultats de la simulation.

### III.2.2.n Nombre de spires par phase de l'enroulement du stator :

À partir de la loi de Boucherot

$$T_{ph} = \frac{V_{ph}}{4.44 \times f \times \varphi \times K_w}$$

### III.2.2.o Courant statorique par phase :

$$I_{ph} = \frac{P_u \times 10^3}{3 \times V_{ph} \times \eta \times \cos \varphi}$$

### III.2.2.p Surface de la section transversale du conducteur statorique :

$$A_s = \frac{I_{ph}}{\delta_s \times a_s}$$

$a_s$  : nombre de file

Le diamètre du fil est calculé à partir de :

$$A_s = \frac{\pi D_c^2}{4} ; \quad D_c = \sqrt{\frac{4 A_s}{\pi}}$$

### III.2.2.q Dimensionnement des encoches statoriques : [26]

#### III.2.2.r Nombre d'encoches :

En général, le nombre d'encoches  $m$  par pôle et par phase dans les moteurs de petite et moyenne taille varie entre 3 et 5

$$S_s = 3 \times p \times m$$

Selon [Bouchard], pour les moteurs dont le diamètre extérieur du circuit magnétique est en deçà de 350 ou 400 mm, le pas d'encoche ne devrait pas être inférieur à 10 mm [24]

#### III.2.2.s Pas d'encoches :

$$Y_{ss} = \frac{\pi D}{S_s}$$

Le nombre total de conducteurs de stator =  $3 \times 2 \times T_{ph}$

Nombre total de conducteurs par encoche :  $Z_{ss} = \frac{3 \times 2 \times T_s}{S_s}$

#### III.2.2.t La surface totale de l'encoche $E_s$ :

C'est la surface du cuivre  $S_{cui}$  en tenant compte du coefficient de remplissage  $C_{rem}$

$$C_{rem} = \frac{\text{Surface du cuivre}}{\text{Surface totale de l'encoche}}$$

$C_{rem}$  : 0.35 jusqu'à 0.4 pour les machines de puissance inférieure à 10 Kw

$C_{rem}$  : 0.4 jusqu'à 0.44 pour les machines de puissance supérieure à 10 Kw [24]

La surface totale de l'encoche  $E_s = \frac{S_{cui}}{C_{rem}}$



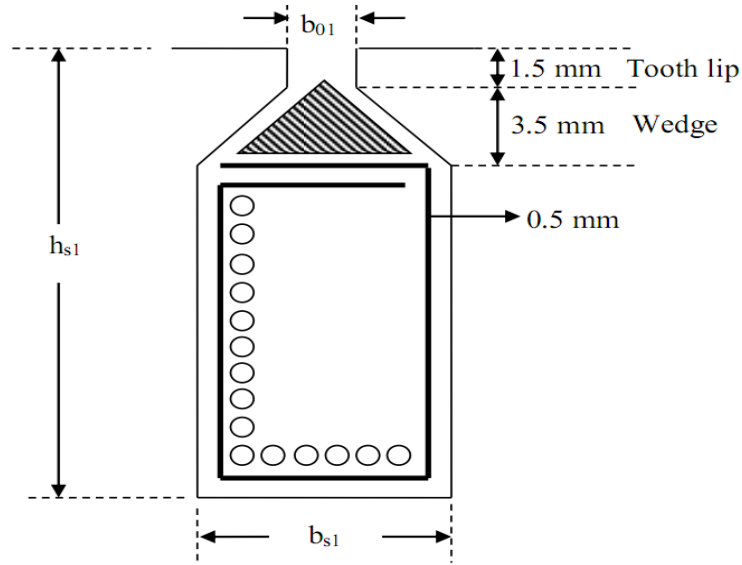


Figure III 3: forme des encoches statorique-[26]

$n_v$  = Nombre de conducteurs verticalement

$n_h$  = Nombre de conducteurs horizontalement

$$\frac{n_v}{n_h} = 3 \text{ jusqu a } 5 ;$$

#### III.2.2.u Hauteur de lencoche statorique :

$$h_{s1} = n_v \times D_c + 4 \times 0.5 + 3.5 + 1.5 + 2$$

(0,5 mm est l'épaisseur de l'isolation et 2 mm pour le jeu et la tolérance)

#### III.2.2.v Largeur de l'encoche :

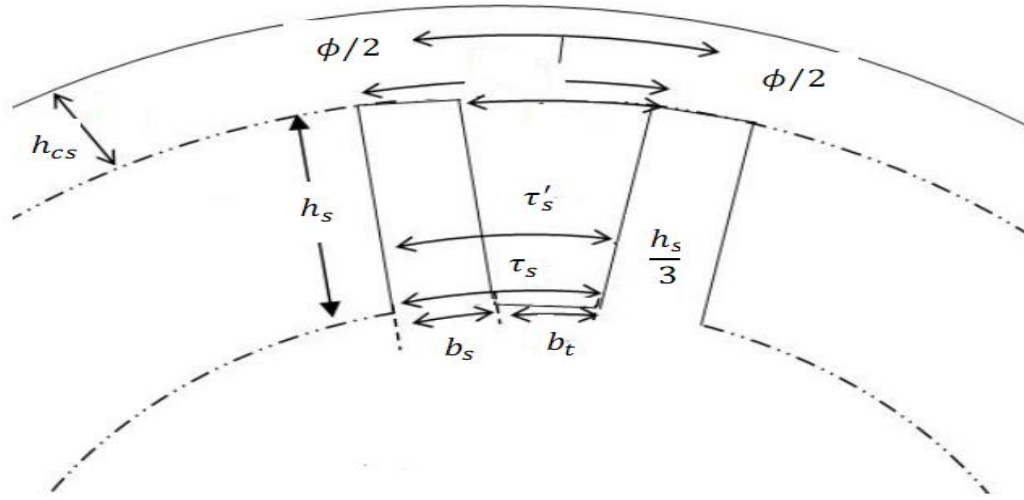
$$b_{s1} = n_h \times D_c + 2 \times 0.5 + 2$$

(0,5 mm est l'épaisseur de l'isolation et 2 mm pour le jeu et la tolérance)

#### III.2.2.w Ouverture de l'encoche :

$$b_{01} = \frac{2}{5} \times b_{s1}$$

### III.2.2.x Induction dans les dents statoriques :



**Figure III 4: dent de forme trapézoïdale[24]**

Une fois que le pas des encoches statoriques, la largeur des encoches et celle des dents statoriques sont définis, on peut calculer la valeur de l'induction magnétique dans les dents du stator. Cette valeur ne doit pas dépasser 1,8 tesla.

Lorsque la dent a une forme trapézoïdale, la densité du flux magnétique varie d'une section à l'autre (puisque la section d'un trapèze n'est pas constante sur toute sa largeur),

Pour obtenir une précision dans le calcul, on a recours à la méthode de Simpson, qui stipule que l'on doit calculer l'induction magnétique moyenne sur trois sections de la dent (étroite, large et au milieu) [Liwschitz].

Une autre méthode consiste à supposer que la largeur représentative de la dent se situe au tiers de sa hauteur, en partant de la dimension la plus étroite [Sawhney], [Liwschitz], [Bouchard].

Par conséquent, la détermination de l'induction dans les dents se fait selon les étapes suivantes [Sawhney] :[6]

Le diamètre au tiers de la hauteur de la dent :  $D'_s = D + \frac{1}{3} \times h_s \times 2$

Le pas d'encoche au tiers de la hauteur de la dent :  $\tau' = \frac{\pi \times D'_s}{S_s}$

La largeur de la dent :  $b'_{ts} = \tau' - b_{s1}$

La section de la zone des dents statoriques par pôle :  $A'_{ts} = b'_{ts} \times L_i \times \frac{S_s}{p}$

L'induction moyenne dans les dents statoriques :  $B'_{tsmoy} = \frac{\phi}{A'_{ts}}$

L'induction maximale dans les dents statoriques :  $B'_{tsmax} < 1.5 \times B'_{tsmoy}$

Généralement, on prend  $B'_{tsmax} = 1.36 \times B'_{tsmoy}$  [24]

### III.2.2.y Hauteur de la culasse du stator :

L'épaisseur du culasse du stator est déterminée en se basant sur le principe de conservation du flux magnétique entre l'entrefer et le dos du stator.

Le flux magnétique total sous un pôle se divise en deux parties, chacune se dirigeant vers le pôle magnétique le plus proche de chaque côté.

Ainsi, la quantité de flux traversant la couronne magnétique du stator correspond à la moitié du flux situé sous un pôle.

La valeur maximale de l'induction magnétique dans le noyau du stator se situe généralement entre 1,2 et 1,4 T

Le flux dans le noyau du stator :  $\varphi_{CS} = \frac{\varphi}{2}$

$$\frac{\varphi}{2} = B_{Cmoy} \times S$$

$$S = \frac{\varphi}{2 \times B_{Cmoy}} = h_c \times L_I$$

$$\text{Hauteur de la culasse } h_c = \frac{\varphi}{2 \times B_{Cmoy} \times L_I} \quad [24]$$

### III.2.2.z Diamètre extérieur du stator :

$$D_{ext} = D + 2 \times (h_c + h_{s1})$$

### III.2.2.aa Épaisseur de l'entrefer :

$$L_g = 0.2 + 2 \times \sqrt{DL} \quad [28]$$

## III.2.3 rotor :

### III.2.3.a Diamètre du rotor :

$$D_r = D - 2 \times L_g$$

**III.2.3.b Nombre d'encoches rotoriques (ou barres rotoriques) :**

| Les facteurs à réduire ou à éviter                                  | Nombre d'encoches du rotor                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Le moteur fonctionne à une vitesse inférieure à la vitesse nominale | Le nombre d'encoches du rotor $S_r$ doit se situer entre 70 % et 130 % du nombre d'encoches du stator $S_s$ . |
| l'arrêt soudain                                                     | $S_r \neq S_s$ ; $S_r \neq S_s + 3$ ; $S_r \neq 3p, 6p, 9p$                                                   |
| <b>pour éviter les couple asynchrone d'harmoniques</b>              | $S_r \neq S_s$ ; $S_r \neq S_s + 3p$                                                                          |
| <b>pour éviter les couple synchrones</b>                            | $S_r \neq \pm p, 2p, \pm 5p$                                                                                  |
| <b>pour éviter les vibrations</b>                                   | $S_r \neq S_s \pm 1$ ; $S_r \neq S_s \pm 2$ ; $S_r \neq S_s \pm p \pm 1$ ; $S_r \neq S_s \pm p \pm 2$         |

**III.2.3.c Courant dans une barre rotorique :**

On suppose que la force magnétomotrice (mmf) du rotor est égale à 85% de la force magnétomotrice du stator.

$$\text{rotor mmf} = 0.85 \times \text{stator mmf}$$

Les barres du rotor sont regroupées par paires opposées (espacées d'une distance correspondant à un pas polaire, soit  $180^\circ$  électriques).

$$\frac{I_b \times S_r}{2} = 0.85 \times 3 \times T_{ph} \times I_{ph} \quad ; \quad I_b = 0.85 \times 6 \times \frac{T_{ph} \times I_{ph}}{S_r}$$

**III.2.3.d Section de la barre rotorique :**

La section du barreau du rotor peut être déterminée en supposant une valeur appropriée de densité de courant.

La densité de courant influence directement la résistance du rotor et, par conséquent, les performances globales de la machine.

Lorsque la résistance du rotor est élevée, le couple de démarrage s'améliore, mais cela entraîne une augmentation des pertes par effet Joule et une diminution du rendement.

En revanche, une densité de courant élevée réduit la section du conducteur, ce qui augmente la résistance du rotor.

À l'opposé, une faible densité de courant réduit la résistance, ce qui entraîne un couple de démarrage plus faible, mais améliore les performances en régime permanent.

Il est donc essentiel de choisir soigneusement la densité de courant  $\delta$  afin de trouver un bon compromis entre un bon couple de démarrage et un rendement satisfaisant en fonctionnement. Une valeur située entre 5 et 6 A/mm<sup>2</sup> est considérée comme appropriée à cet effet.

Nous avons choisi la densité de courant  $\delta = 5 \text{ A/mm}^2$

Résistance de barre rotorique  $R_b = \rho \times \frac{L_b}{a_b}$

$$a_b = \frac{I_b}{\delta_b}$$

### III.2.3.e Les dimensions d'encoche rotorique :

Des encoches rectangulaires semi-fermées sont utilisées le plus souvent pour les rotors.

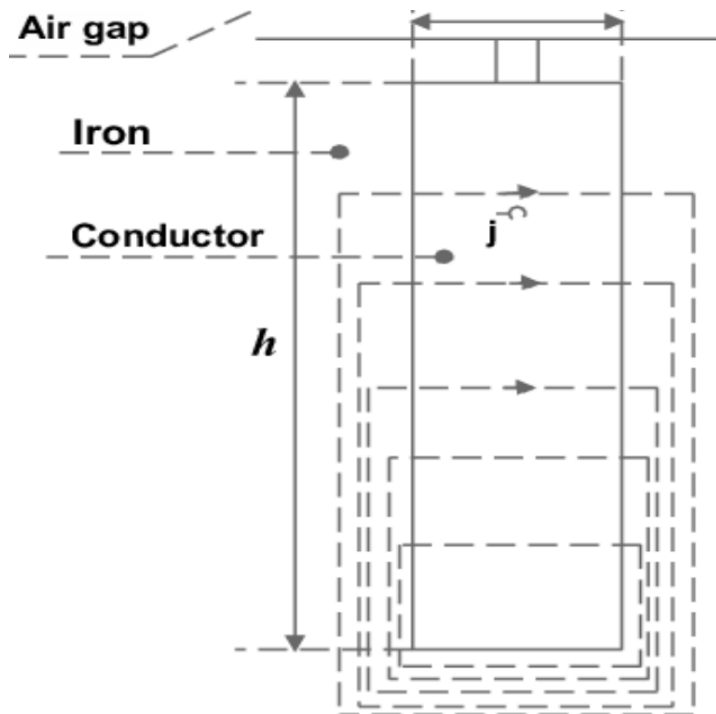


Figure III 5: forme des encoches rotoriques

[https://www.brainkart.com/article/Induction-motors\\_6584/](https://www.brainkart.com/article/Induction-motors_6584/)

La taille de l'encoche doit être telle que le rapport entre la profondeur et la largeur soit compris entre 3 et 4.

#### III.2.3.e.1 Largeur d'encoche rotorique $b_r$ :

$$\frac{h_r}{b_r} = 4 \quad ; \quad h_r \times b_r = a_b \quad ; \quad h_r = 4 \times b_r \quad ; \quad 4 \times b_r \times b_r = a_b \quad ; \quad 4 \times b_r^2 = a_b$$

$$b_r = \sqrt{\frac{a_b}{4}}$$

### III.2.3.e.2 Hauteur de l'encoche rotorique

$$h_r = 4 \times b_r$$

Hauteur d'entrée  $h_w$  suppose 0.5 mm

Largeur d'entrée  $b_w$  suppose 1.5 mm

### III.2.3.f Induction dans les dents rotoriques :

Pour évaluer l'induction dans les dents rotoriques, on utilise une méthode similaire à celle utilisée pour le calcul de l'induction dans les dents statoriques. On aura donc :

Le diamètre au tiers de la hauteur de la dent rotorique ::  $D'_r = D_r - \frac{2}{3} \times h_r \times 2$

Le pas d'encoche au tiers de la hauteur de la dent rotorique:  $\tau' = \frac{\pi \times D'_r}{S_r}$

Largeur de la dent rotorique:  $b'_{tr} = \tau' - b_{r1}$

Section de la zone des dents rotoriques par pôle:  $A'_{tr} = b'_{tr} \times L_i \times \frac{S_r}{p}$

L'induction moyenne dans les dents rotorique:  $B_{trmoy} = \frac{\phi}{A'_{tr}}$

### III.2.3.g Hauteur de la culasse rotorique :

L'induction maximum  $B_{cr}$  dans le noyau rotorique varie entre 1,2 et 1,4 T. La hauteur de la culasse

rotorique peut être calculée de la manière suivante :

Le flux dans la culasse du rotor :  $\frac{\phi}{2} = B_{crmoy} \times S$

La section de la culasse rotorique :  $S = \frac{\phi}{2 \times B_{cmoy}} = h_{cr} \times L_I$

Par conséquent, la hauteur de la culasse rotorique :  $h_{cr} = \frac{\phi}{2 \times B_{cmoy} \times L_I}$

### III.2.3.h Courant de l'anneau de court circuit et section :

Le courant dans la boucle reste faible à proximité des barres où circule un courant fort, tandis qu'il devient important aux points où le courant dans les barres est nul (c'est-à-dire loin du centre du pôle magnétique).

Par conséquent, le courant maximal pouvant circuler dans la boucle se trouve du côté opposé au pôle, Le courant qui traverse chaque barre se divise en deux dans les anneaux, une moitié revient par le conducteur situé à un pas polaire en avant et l'autre moitié revient par le

conducteur situé à un pas polaire en arrière. De ce fait, le courant maximal dans l'anneau correspond à [Sawhney] :

$$I_{e \max} = \frac{1}{2} \times \frac{S_r}{p} \times \sqrt{2} \times I_b$$

Le courant dans l'anneau varie sinusoïdalement, par conséquent sa valeur efficace est:

$$I_e = \frac{1}{\pi} \times \frac{S_r}{p} \times I_b$$

La section d'une l'anneau rotorique est calculée par la formule suivante :  $\delta_e = 5$

$$a_e = \frac{I_e}{\delta_e}$$

### III.3 Le tableau de resultat :

|                                                                   |                                 |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Calculer le diametre interieur de stator D                        | 147.53922362 mm                 |
| Calculer la longueur de machine L                                 | 144.846294408 mm                |
| Nombre de spires par phase de l'enroulement du stator $T_{ph}$    | 96 spires                       |
| Courant statorique par phase $I_{ph}$                             | 20.3609304904 A                 |
| Surface de la section transversale du conducteur statorique $A_s$ | 2.03609304904 mm <sup>2</sup>   |
| Nombre d'encoches $S_s$                                           | 36 encoches                     |
| Pas d'encoches $Y_{ss}$                                           | 12.87522614 mm                  |
| Nombre de conducteur par encoche $Z_{ss}$                         | 16 conducteur                   |
| La surface total de l'encoche $E_s$                               | 93.078585393847 mm <sup>2</sup> |
| Hauteur de l'encoche statorique $h_{s1}$                          | 21.880830251 mm                 |
| Largeur de l'encoche $b_{s1}$                                     | 9.44041512552 mm                |
| Ouverture de l'encoche $b_{o1}$                                   | 3.7761660502 mm                 |
| Hauteur de la culasse du stator $h_c$                             | 32.74785778 mm                  |
| Diamètre extérieur du stator $D_{ext}$                            | 256.796599682 mm                |
| Epaisseur de l'entrefer $L_g$                                     | 0.4923731162 mm                 |
| Diamètre du rotor $D_r$                                           | 146.554476711                   |
| Nombre d'encoches rotoriques (ou barres rotoriques) $S_r$         | 46                              |
| Courant dans une barre rotorique $I_b$                            | 216.71112105 A                  |
| Section de la barre rotorique $a_b$                               | 36.118520175 mm <sup>2</sup>    |
| Largeur d'encoche rotorique $b_r$                                 | 3.06669692727 mm                |
| Hauteur d'entrée $h_w$                                            | 0.5 mm                          |
| Largeur d'entree $b_w$                                            | 1.5 mm                          |

|                                                       |                 |
|-------------------------------------------------------|-----------------|
| Hauteur de lencoche rotorique $h_r$                   | 12.266787709 mm |
| Hauteur de la culasse rotorique $h_{cr}$              | 34.11235186     |
| Courant de l'anneau de court circuit et section $a_e$ | 132.214143529   |

## Interprétation les résultats concernant le modèle de Maxwell:

### Les pert solides :

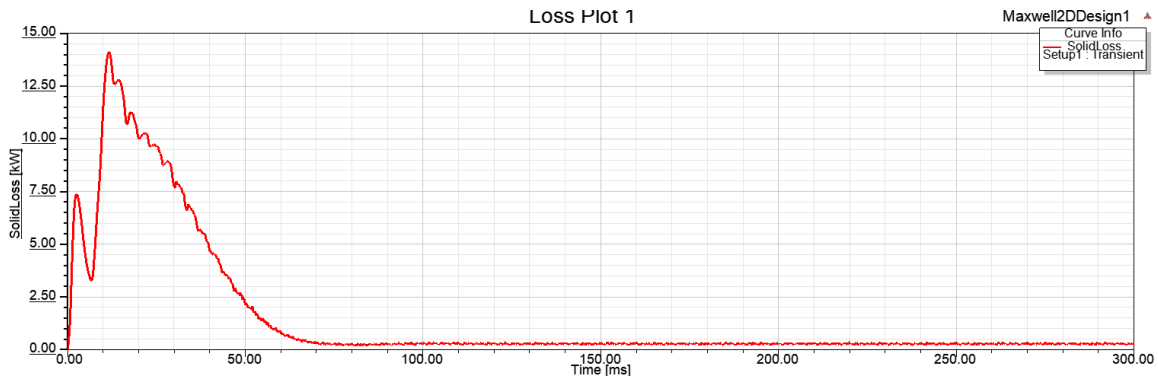


Figure III 6: courbe les solides

La courbe représente les variations des pertes solides, ou pertes fer, résultant des courants de Foucault qui se forment suite à la variation du champ magnétique à l'intérieur des matériaux conducteurs.

Ces courants s'opposent au changement du flux magnétique qui les a engendrés (selon la loi de Lenz), ce qui entraîne ces pertes thermiques.

#### Première phase :

Pertes très élevées (atteignant ~15 W), représentant le pic

#### Les causes :

Des variations très rapides du champ magnétique lors du démarrage du moteur à partir de l'arrêt génèrent des courants de Foucault puissants à l'intérieur des parties métalliques solides.

La densité du flux sur le dos de la partie statique : 3,35651 Tesla, ce qui est élevé pour les norme Cela entraîne des pertes

#### Deuxième phase :

Les pertes commencent à diminuer progressivement.

#### Les causes :

La diminution des variations du flux magnétique à mesure que le moteur se rapproche de la vitesse nominale . Ainsi, les courants de Foucault diminuent à l'intérieur du noyau en fer.



## Le couple :

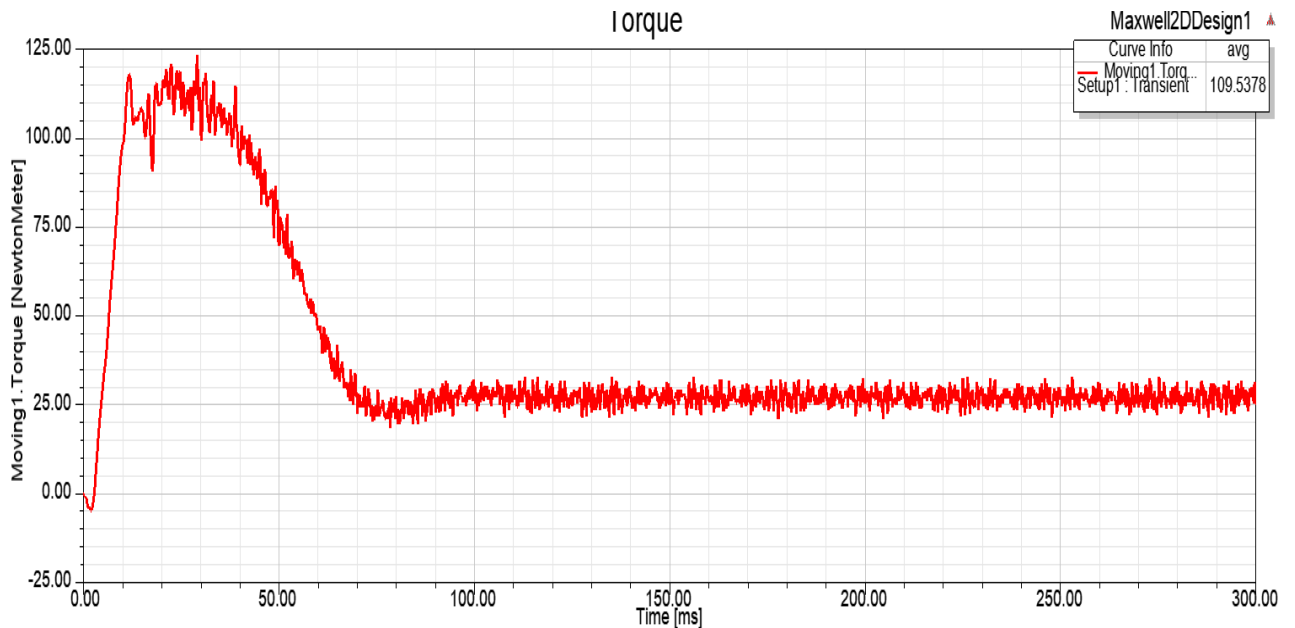


Figure III 7: courbe de couple

De 0 à environ 40–50 ms :

On observe que le couple augmente très rapidement jusqu'à atteindre une valeur maximale dépassant 120 N.m, avec la présence de fortes oscillations.

Ce pic élevé du couple est lié à la phase de démarrage, durant laquelle le moteur doit surmonter l'inertie initiale ainsi que le couple des charges mécaniques associées

### Causes des oscillations:

Au début, le glissement est égal à 1 ( $s = 1$ ), ce qui signifie une grande différence entre la vitesse du rotor et celle du champ tournant. Cela provoque une variation continue et rapide des courants et du flux magnétique. Cela génère de grandes oscillations du couple. Selon la relation :  $T \approx \phi * I * \cos\varphi$

Dans régime permanent :

On remarque que le couple commence à diminuer progressivement avec une réduction des oscillations, ce qui est dû à l'accélération du rotor et à son rapprochement de la vitesse synchrone, réduisant ainsi le besoin d'un couple élevé. Les petites oscillations sont généralement dues aux ondulations magnétiques, aux harmoniques, ou à un léger déséquilibre mécanique ou électrique.

## Le courant :

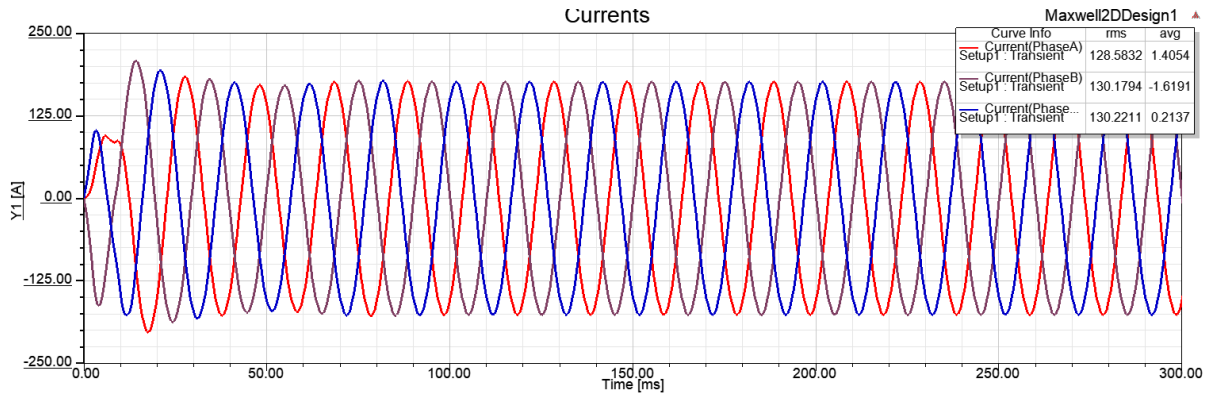


Figure III 8: courbe des courants statorique

Au démarrage, le moteur absorbe un courant de démarrage élevé, pouvant atteindre jusqu'à 8 fois le courant nominal. Une fois la vitesse nominale atteinte, le courant se stabilise à sa valeur nominale, laquelle dépend de la charge mécanique appliquée et des caractéristiques du moteur. Une augmentation du glissement entraîne une augmentation du courant absorbé afin de fournir le couple requis.

#### Force electro motrice :

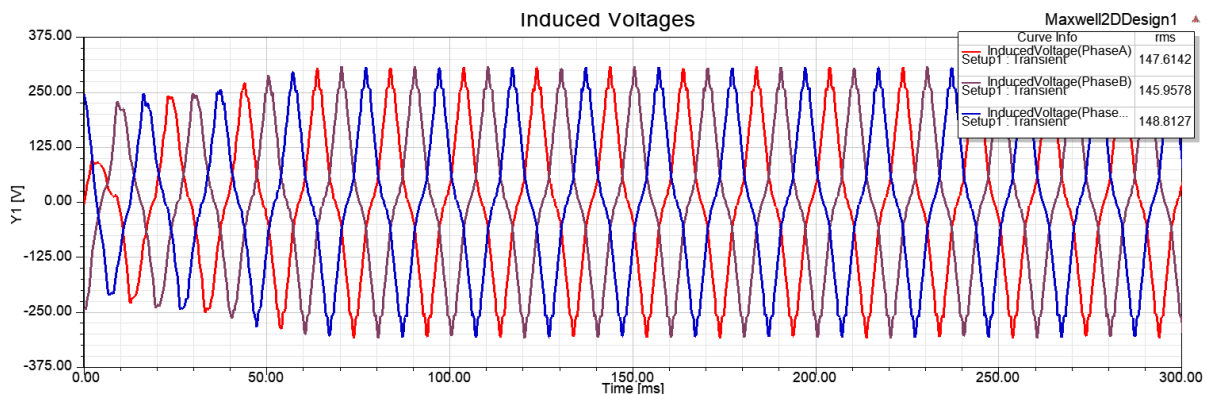


Figure III 9: courbe des tension induit

#### Au début du démarrage (régime transitoire) :

Le flux magnétique est instable et varie très rapidement en raison des courants d'appel élevés

Selon la loi de Faraday de l'induction électromagnétique :  $EMF = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} * N$

Tout changement rapide du flux magnétique  $\Phi$  génère une tension induite élevée et oscillante.

Ainsi, la courbe apparaît à ce stade de manière irrégulière.

#### Après la stabilisation (régime permanent) :

Le flux magnétique devient plus régulier et prend une forme proche du sinusoïdal.

En conséquence, la tension induite devient elle aussi presque sinusoïdale et stable, avec trois phases équilibrées.

### La vitesse de rotation :

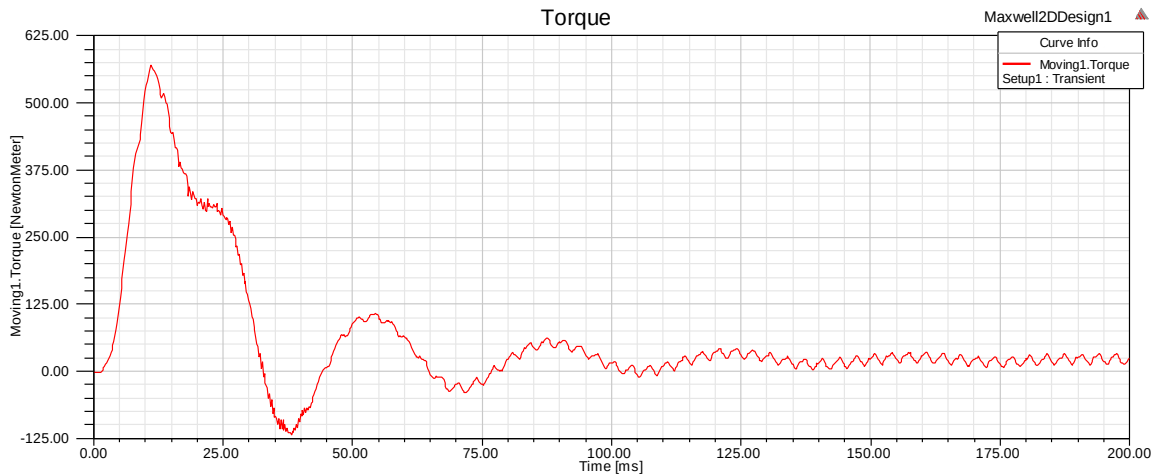


Figure III 10: courbe de Vitesse rotation

La courbe montre une transition naturelle et stable du moteur de l'état de repos à un fonctionnement stable. Elle reflète de bonnes performances en termes d'accélération et de contrôle du couple, et la stabilité de la vitesse à la fin est une preuve de l'équilibre du moteur et de l'absence de problèmes majeurs de fonctionnement.

### Les model calculer comparer avec le model de maxwell :

#### Le couple :



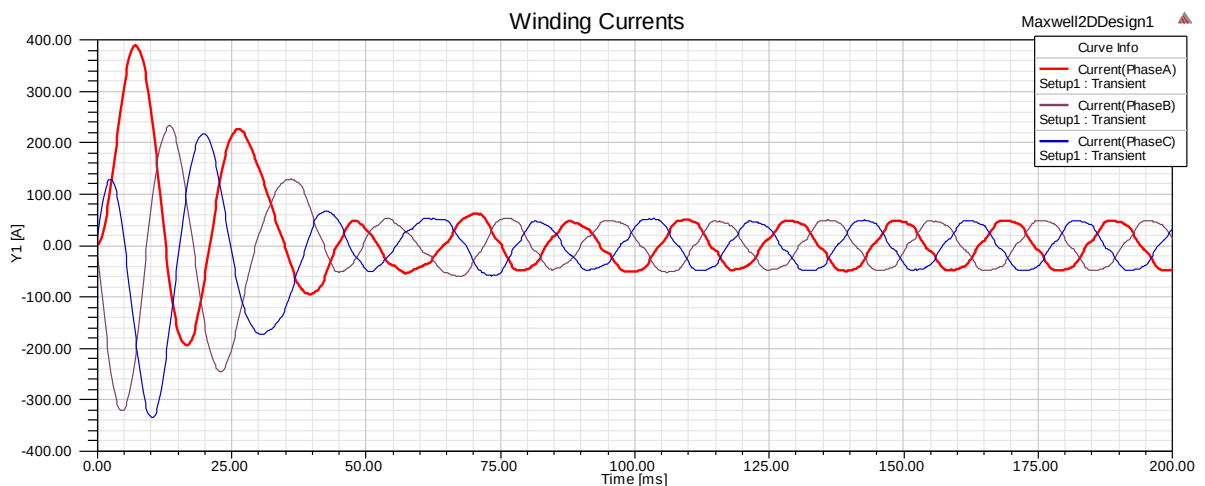
En comparant la courbe du couple électromagnétique aux résultats présentés dans le tableau 3, on observe une bonne concordance en termes de comportement dynamique global du couple.

Au début du fonctionnement, le couple présente une montée brutale, suivie d'une chute rapide accompagnée d'oscillations dues aux effets transitoires du champ magnétique.

Après environ 100 millisecondes, le couple commence à se stabiliser progressivement, avec la présence de quelques ondulations de faible amplitude, ce qui reflète le passage du moteur à un régime quasi stationnaire.

La différence principale réside dans la valeur maximale du couple : dans le modèle Maxwell, celle-ci ne dépasse pas 120 N·m, tandis que le modèle que nous avons conçu affiche une valeur supérieure à 550 N

### Le courant :



**Figure III 11: courbe des courant**

a figure ci-dessus illustre l'évolution des courants des enroulements triphasés dans le modèle que nous avons conçu.

Au début du fonctionnement, les courants présentent des oscillations irrégulières et de grande amplitude.

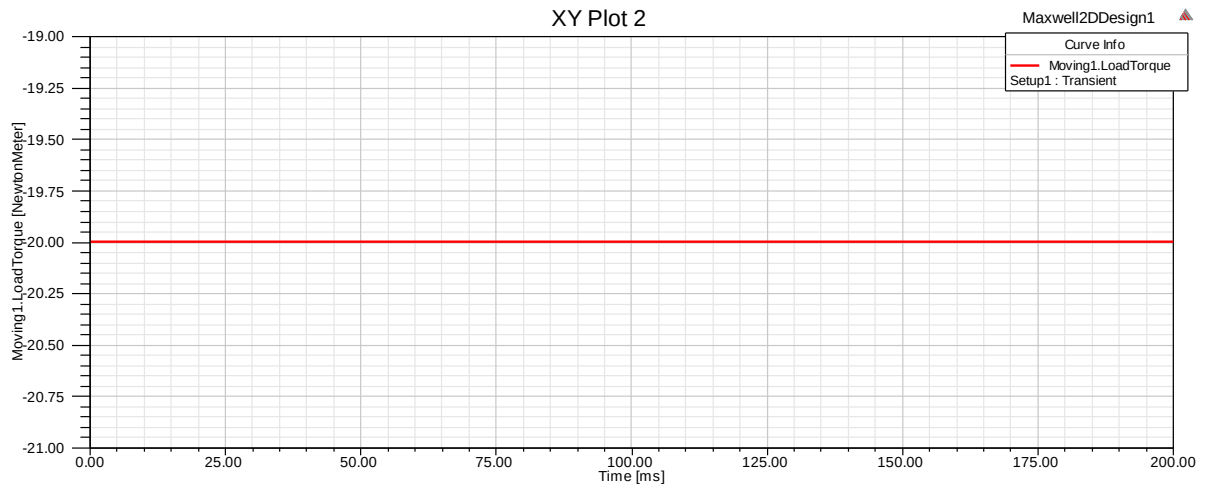
À partir de 60 à 80 millisecondes environ, on observe une stabilisation progressive des courants, qui deviennent proches d'une forme sinusoïdale régulière et équilibrée.

En comparant le courant dans le modèle que j'ai conçu avec celui du modèle présenté dans Maxwell, on observe une similarité notable lors de la phase de démarrage.

Cependant, ce qui distingue la courbe obtenue dans notre modèle, c'est qu'elle présente une réponse plus réaliste, avec une transition progressive et une représentation fidèle des détails du comportement dynamique, ce qui reflète un bon réglage des paramètres et un choix judicieux des conditions de simulation.

Cela confirme que le modèle conçu reflète avec précision le comportement du moteur asynchrone, aussi bien en régime transitoire qu'en régime permanent

### Le couple resistive :

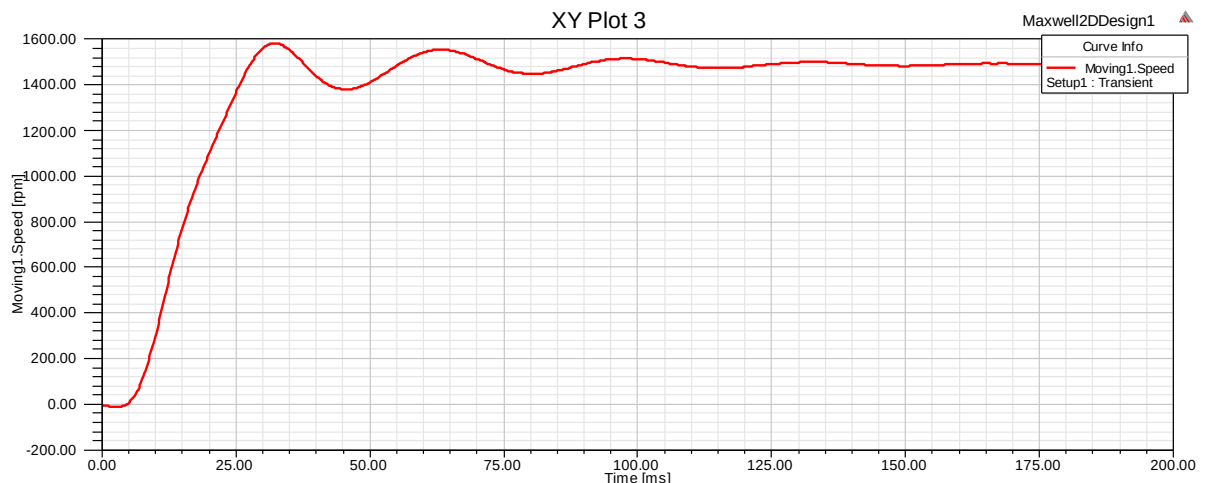


**Figure III 12: courbe de couple resistive**

La courbe montre l'interaction entre le couple électromagnétique et le couple résistant pendant le fonctionnement. Au début, le couple électromagnétique est supérieur au couple résistant, ce qui permet au moteur d'accélérer. Avec le temps, les deux couples se rapprochent, et la stabilité est atteinte lorsqu'ils deviennent égaux, c'est-à-dire lorsque  $C_e = C_r$ , la vitesse devient alors constante.

Ce comportement confirme l'équilibre naturel entre le moteur et la charge. Cela signifie que le moteur a bien démarré.

### La vitesse de rotation :



**Figure III 13: courbe de Vitesse de rotation**

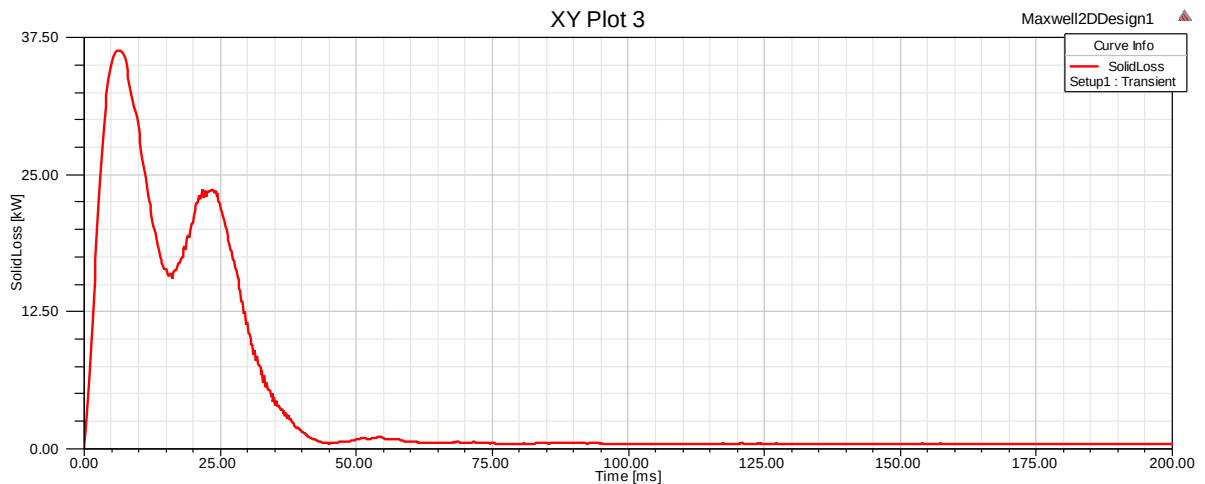
Phase de demrrage (0-25 ms) :le moteur presente une acceleration rapide de la la vitesse atteignant

un pic supérieur à 1550 tr/min, ce qui représente un phénomène de survitesse transitoire typique lors de la formation du couple électromagnétique initial.

Phase transitoire : on observe des oscillations progressivement amorties, traduisant les effets dynamiques du système.

Phase de stabilisation : la vitesse se stabilise autour de 1450 tr/min, une valeur cohérente avec les caractéristiques d'un moteur asynchrone à deux paires de pôles alimenté en 50 Hz, en tenant compte d'un glissement typique de 3 à 4 %

### Les pert fere



**Figure III 14: courbe des pert fere**

La comparaison entre la courbe des pertes fer et celle du modèle montre une concordance claire. La valeur maximale des pertes se produit lors de l'accélération initiale, en raison de la variation brusque du flux magnétique.

Les oscillations transitoires augmentent temporairement les pertes, avant que celles-ci ne diminuent progressivement.

Les pertes se stabilisent à des valeurs très faibles une fois que la vitesse et le flux atteignent un régime permanent, ce qui reflète le comportement normal de la machine en fonctionnement stable.

### Conclision :

asynchrone triphasé, en nous appuyant sur des normes techniques rigoureuses et des principes physiques bien établis. Nous nous sommes concentrés sur le choix optimal des charges magnétique et électrique spécifiques, tout en analysant leur impact sur les performances globales de la machine, notamment les pertes fer, le facteur de puissance et la capacité de surcharge.

Nous avons adopté une méthodologie de calcul structurée qui nous a permis de déterminer les dimensions principales du stator, du rotor, de l'entrefer ainsi que le nombre de pôles, de manière à assurer un bon compromis entre performance électromagnétique et robustesse mécanique.

Une fois ces calculs terminés, nous les avons confrontés aux résultats obtenus par un modèle de simulation développé sous ANSYS Maxwell. La comparaison a montré une grande cohérence au niveau du comportement électromagnétique, ce qui reflète la précision de notre démarche et confirme la validité des hypothèses adoptées dans la phase de conception.

Ce chapitre constitue ainsi une étape déterminante dans le déroulement de notre projet, puisqu'il établit les fondations techniques sur lesquelles s'appuieront les analyses de simulation et de validation à venir.

# **I Conclusion générale**



## Conclusion générale

Le moteur asynchrone triphasé constitue l'une des machines électriques les plus utilisées dans le domaine industriel, en raison de sa simplicité de construction, de sa robustesse mécanique et de ses performances satisfaisantes dans une large gamme d'applications. Ce mémoire s'est fixé pour objectif d'étudier, de manière méthodique et approfondie, l'ensemble des aspects liés à la conception de cette machine, en allant des principes physiques fondamentaux jusqu'à la modélisation numérique avancée.

Le premier chapitre a permis d'analyser la structure interne du moteur asynchrone, en décrivant en détail les éléments constitutifs du stator et du rotor, tout en distinguant les types de rotors (à cage d'écureuil ou bobinés) et leurs implications sur le démarrage et le fonctionnement en régime permanent. Des notions essentielles telles que le glissement, l'induction électromagnétique, et le bilan de puissance ont été abordées pour établir une base théorique solide sur le fonctionnement dynamique de la machine. Dans le second chapitre, l'étude s'est focalisée sur les techniques de bobinage, considérées comme un facteur clé dans la performance électromagnétique globale de la machine. Les configurations de bobinage (concentré, réparti, imbriqué, ondulé) ont été comparées en termes de structure géométrique, d'atténuation des harmoniques, et d'influence sur la répartition du flux. Les critères de conception tels que le nombre de pôles, les encoches, le facteur de remplissage, la classe thermique d'isolation et l'équilibrage des phases ont été examinés afin de garantir un fonctionnement optimal. Le troisième chapitre a été consacré aux calculs préliminaires de dimensionnement, essentiels pour déterminer les principales dimensions géométriques du moteur. À partir des équations analytiques rigoureuses, les choix des charges spécifiques magnétique ( $B_{av}$ ) et électrique ( $a_c$ ) ont été justifiés selon les normes industrielles et les contraintes de performance (rendement, facteur de puissance, capacité de surcharge, pertes thermiques). Les dimensions du stator, de l'entrefer et du rotor ont été estimées avec précision, en intégrant les vérifications nécessaires sur la vitesse périphérique, l'épaisseur de l'entrefer, et la structure de refroidissement.

Enfin, des simulations numériques tridimensionnelles ont été réalisées à l'aide du logiciel **ANSYS Maxwell**, fondé sur la méthode des éléments finis (FEM), pour valider les choix de conception. Ces analyses ont permis de visualiser la répartition des flux

magnétiques, d'identifier les zones de saturation, et d'estimer les pertes fer et cuivre. Les résultats obtenus ont montré une bonne concordance avec les hypothèses théoriques, consolidant ainsi la fiabilité du modèle conçu.

Ce travail constitue donc une contribution technique pertinente au domaine du dimensionnement des machines électriques, en proposant une méthodologie complète alliant fondements théoriques rigoureux, calculs analytiques, et outils de simulation avancés. Il répond pleinement aux exigences actuelles en matière d'efficacité énergétique, de fiabilité industrielle et de durabilité des systèmes électromécaniques.

# **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1] SOUAD BADJA et SAID GAOUÏ. ANALYSE DE L'EFFET DE DÉFAUT SUR LES PERFORMANCES ET LES PARAMÈTRES D'UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ EN UTILISANT MAXWELL 2D - MÉMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE – 2018
- [2] REBBAH REDJEM . CALCUL ET CONCEPTION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR DES MACHINES ELECTRIQUES APPLICATION AUX MOTEURS ASYNCHRONES - PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE OPTION MACHINES ÉLECTRIQUES DANS LEURS ENVIRONNEMENTS -Université Mentouri Constantine- 2006
- [3] ABBAS SADIA et HACID FATMA et HADJAB HAKIM . CONCEPTION OPTIMALE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE A DOUBLE CAGE- MÉMOIRE DE FIN D'ETUDE D'INGENIEUR D'ETAT EN ELECTRO TECHNIQUE- UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU-2008/2009
- [4] ROSTANE RAFIK ET OUALI MOHAND AREZKI . DIMENSIONNEMENT D'UN MOTEUR A SYNCHRONE À CAGE D'ÉCUREUIL À 8 PÔLES - MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE - UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU-2018
- [5] ARAB ABDERRAHMEN ET ATIG MAHDI . CONTRIBUTION AU DIMENSIONNEMENT D'UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ À CAGE - MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE - UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU – 2013
- [6] NADIA ABBAS AND MOHAMMED OU RAMDANE HASDANE - CONCEPTION OPTIMALE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ À RENDEMENT PRÉMIUM - MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE - UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU-2017
- [7] BOULEFDAOUI FATIMA ZAHRA ET BOULEHIA IMENE . ETUDE DES PROCÈDES DE VARIATION DE VITESSE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE - MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE – 2022
- [8] ABDI AZEDDINE . ETUDE ET MODÉLISATION DES MACHINES ÉLECTRIQUES - MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE - UNIVERSITÉ MOHAMED KHEIDER BISKRA – 2016

- [9] GHAMRI KHALED . TECHNIQUE DE BOBINAGE D'UN MOTEUR À DEUX VITESSES - MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE - UNIVERSITÉ MOHAMED KHEIDER BISKRA – 2019
- [10] SALAH DJAMILA ET AHCENE FAZIA . CALCUL D'UN MOTEUR ASYNCHRONE A DOUBLE CAGE - MEMOIRE DE FIN D'ÉTUDES EN VUE D'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR D'ÉTAT EN ELECTROTECHNIQUE -2011/2012
- [11] BOUZARIA SAMY ET OUIKENE AREZKI . CONCEPTION D'UN MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASÉ - MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE – 2021/2022
- [12] BOUCHAREB KHALED ET CHELGHOUM ABDELMOUIZ . ETUDE, MODÉLISATION ET SIMULATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE - MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE – 2020
- [13] MOURAD HELLAL ET SALIM RAMDANE . ETUDE DES PERFORMANCES DE LA MACHINE ASYNCHRONE SOUS DÉFAUTS - MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE – 2017
- [14] GUETTACHE HOUSSAM ET LAMRAOUI MOUSSA . CONCEPTION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR D'UN MOTEUR ASYNCHRONE À CAGE D'ÉCUREUIL DE 1.5 KW
- [15] MOURAD HELLAL ET ALIM RAMDANE
- [16] Juha Pyrhönen, Tapani Jokinen and Valéria Hrabovcova ;2008
- [17] AGHILES BEN SLIMANE ET NADIR MEHALLA . CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE TYPE DE BOBINAGE SUR LE COMPORTEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE D'UNE MACHINE SYNCHRONE À PÔLES LISSES 150VA - MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE- UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU – 2015
- [18] NOUADJI REDHA . EFFET DES DIFFÉRENTS TYPES D'ENROULEMENTS SUR LE COMPORTEMENT DU MOTEUR ASYNCHRONE - MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE - UNIVERSITÉ MOHAMED KHEIDER BISKRA – 2015
- [19] IMAD DJIDJEKH EDDIN . ETUDE COMPARATIVE DES DIFFÉRENTS TYPES DE BOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ À CAGE - UNIVERSITÉ MOHAMED KHEIDER BISKRA - 2018
- [20] COURS ALEXSIS ILUGUNA

- [21] RACHID KRID ..MODELISATION ET IDENTIFICATION DE LA MACHINE SYNCHRONNE A AIMANTS PERMANENTS - THESE DE DOCTORAT- UNIVERSITÉ DE BLIDA 1-
- [22] ( <https://electrically4u.com/types-of-armature-winding-drum-winding-lap-winding-wave-winding/> )
- [23] DR. BOUNADJA ELHADJ - Machines Electriques Approfondies (Cours et Exercices)
- [24] DR. KAIKAA .M.Y .COURS DE CALCUL DES MACHINES ELECTRIQUES - Université constantine1
- [25] OULD AMROUCHE AREZKI ET BOUALAM MOHAMED , IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES D'UN MOTEUR ASYNCHRONNE : APPLICATION AU MOTEUR DU LABORATOIRE - MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE -2013
- [26] DR. R. C. GOEL ET NAFEEES AHMED .3- PHASE INDUCTION MOTOR DESIGN -UNIVERSITY, DEHRADUN, UTTARAKHAND.
- [27] HARKATI NACEREDDINE ET HAUD LAHCEN D'ETERMINATION DES PARAM`ETRES DE LA MACHINE ASYNCHRONNE AVEC PRISE EN COMPTE DES EFFETS THERMIQUE, PELLICULAIRES ET DE SATURATION –PROJET DE FIN DE FIN D'ETUDE D'INGENIEUR D'ETAT EN ELECTROTECHNIQUE - ECOLE NATIONALE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE – 2009
- [28] V.RAJINI ET V.S.NAGARAAN – ELECTRICAL MACHINE DESIGN – 2018
- [29] MEZIANI SEIF ALLAH . DIMENSIONNEMENT D'UNE MACHINE ASYNCHRONNE À ROTOR BOBINÉ - MÉMOIRE DE MASTER EN ELECTROTECHNIQUE. -ECOLNATIONALE POLYTECHNIQUE-2017
- [30] ( <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Machine-asynchrone-page-3.html> )
- [31] ( [https://slideplayer.fr/slide/17991686/#google\\_vignette](https://slideplayer.fr/slide/17991686/#google_vignette) )
- [32] ( <https://construire-sa-moto-electrique.org/moteur/asynchrone> )
- [33] ( <https://cnautiquefrance.com/it/volano-evinrude-johnson/661-3-4-cv-2t-volano-magnetico-omc-johnson-evinrude.html> )
- [34] ( <https://rotor.mx/producto/ventilador-weg-90/> )

- [35]( <https://www.artofit.org/image-gallery/902619950294672668/dc-motor-working-principle-construction-and-diagram-explanation/> )
- [36] ( <https://www.pinterest.com/pin/why-damper-windings-used-in-synchronous-motors--784893041282246105/> )
- [37] ( <https://www.urbini.be/fr/contact-bobinage> )
- [38] ( [Winding inductances of fractional slot surface-mounted permanent magnet brushless machines | Emerald Insight](#) )
- [39](<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/03321640910999888/full/html>)
- [40] ( <https://www.electrical-info.net/2013/09/what-is-function-of-interpoles-and-how.html> )
- [41] ( [SOLUTION: Bobinage des moteurs courant alternatif triphas - Studypool](#) )