



U. Mohamed
Khider-Biskra

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



U. Mohamed
Khider-Biskra

Université Mohamed Khider-Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département : Génie électrique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER EN: Électromécanique

Thème

**Modélisation d'un moteur
asynchrone par FEMM**

Présenté par :

Yasser djellali

Jury composé de:

Pr. CHERIET Ahmed	Pr.	Université de Biskra	Rapporteur
Pr. Chenoufi Halim	Pr.	Université de Biskra	Président
Pr. Dandouga Abdelhakim	Pr.	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2020– 2021

Dédicace

*Tout d'abord, nous remercions Dieu
d'avoir terminé le travail*

À ma mère et à mon père

À mes frères

À mes professeurs

À mes collègues

À toute ma chère famille et mes amis

Je dédie cet humble travail

REMERCIEMENTS

A l'occasion de la présentation de cette thèse, je remercie tout le monde Ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, font le travail

Merci beaucoup, Professeur CHERIET Ahmed

Pour tout ce qu'il nous apporte

Je remercie également tous les membres de ma famille, en particulier ma mère et mon père.

RESUME

Dans cette étude, nous étudions la machine asynchrone par la méthode des éléments finis. Cette étude s'est concentrée sur des aspects majeurs dans le domaine de la conception des machines électriques, l'effet des principaux paramètres sur la valeur du couple électromagnétique du moteur. Cette machine est modélisée à l'aide d'une méthode numérique à savoir la méthode des éléments finis implémentée dans l'environnement FEMM, qui prend en compte saturation magnétique. Une partie de cette étude est consacrée à l'établissement d'un modèle basé sur les réseaux de neurones afin de prédire le couple électromagnétique.

Mots clés:

FEMM, Modélisation, RN, MAS.

ملخص

في هذه الدراسة، قمنا بدراسة المحرك الغير المتزامن بطريقة العناصر المحددة. ركزت هذه الدراسة على الجوانب الرئيسية في مجال تصميم الآلات الكهربائية، وتأثير المعلمات الرئيسية على قيمة عزم الدوران الكهرومغناطيسي للمحرك. تم تصميم هذه الآلة باستخدام طريقة رقمية، وهي طريقة العناصر المحددة المطبقة في بيئة FEMM، والتي تأخذ في الاعتبار التشبع المغناطيسي. تم تخصيص جزء من هذه الدراسة لإنشاء نموذج يعتمد على الشبكات العصبية للتنبؤ بالعزم الكهرومغناطيسي.

الكلمات المفتاحية :

FEMM، النمذجة، الشبكات العصبونية، المحرك الغير متزامن.

Sommaire

➤ Résumé

Introduction générale : 2

Chapitre 1 : Généralités sur les moteurs électriques

1.1	Introduction :	2
1.2	Classification des machines électriques:	2
1.3	La machine à courant continu :.....	3
1.3.1	Constitution:	3
1.3.2	L'inducteur (ou circuit d'excitation) :	4
1.3.3	L'induit (circuit de puissance) :	4
1.3.4	Le collecteur et les balais :	5
1.3.5	Expression de la FEM induite :	5
1.3.6	Expression du couple électromagnétique :	5
1.3.7	Conversion de puissance :	6
1.3.8	Les différents types de machines à courant continu :	6
1.3.9	Caractéristiques de chaque type:	7
1.3.10	Bilan des puissances d'un moteur à courant continu :	7
1.3.11	Le rendement :	8
1.3.12	Les tensions les plus utilisées sont 12 et 24 V, dont certains avantages sont :	8
1.4	Machine synchrone :.....	8
1.4.1	Présentation de la machine synchrone :	8
1.4.2	Le domaine principal d'utilisation de la machine synchrone :	9
1.4.3	Constitution d'une machine synchrone :	9
1.4.4	Types de machines synchrones :	10
1.4.5	Types de fonctionnement.....	11
1.4.6	Relation vitesse-fréquence :	12
1.5	La machine asynchrone :	12
1.5.1	Définition :	13
1.5.2	Rôle :	13
1.5.3	Symbole :	14
1.5.4	Construction :	14

1.5.5	Différentes caractéristiques de la machine asynchrone :.....	14
1.5.6	Glissement :	14
1.5.7	Le couple :	15
1.6	Machines à réluctance variable :	15
1.6.1	Principe général de la réluctance variable :	16
1.6.2	Le moteur :	16
1.6.3	Déférents types des MRV :	17
1.6.4	Avantage :	19
1.6.5	Inconvénients :	19
1.7	Conclusion :	19

Chapitre 2: Moteur asynchrone

2.1	Introduction :	20
2.2	Constitution de la machine asynchrone :	20
2.3	Modèle équivalent:.....	21
2.4	Eléments d'un moteur asynchrone :	22
2.4.1	Le Stator :	22
2.4.2	Le rotor :	22
2.5	Moteur asynchrone à cage d'écureuil : (rotor en court-circuit) :	23
2.6	Moteur asynchrone à rotor bobiné : (rotor à bague) :	24
2.7	A doublé cage :	25
2.8	A doublé encoches ou à encoches profondes :	25
2.9	Principe de fonctionnement de la machine asynchrone :	25
2.10	Glissement d'une machine asynchrone :	26
2.11	Mesure de la puissance absorbée :	26
2.12	Expression du rendement :	31
2.13	Couplage étoile/triangle :	31
2.14	Avantages et inconvénients de la machine asynchrone :	32
2.14.1	Il ya plusieurs avantages dans le moteur asynchrone :	32
2.14.2	Inconvénients Parmi les inconvénients de la machine asynchrone :	32
2.15	Conclusion :	32

Chapitre 3 : Modélisation du MAS par le logiciel FEMM :

3.1	Introduction :	33
3.2	Principe de la méthode des éléments finis:	33
3.3	Types d'éléments finis:	34

3.4	Présentation du programme de modélisation FEMM:	35
3.5	Fonctionnement du logiciel:	35
3.5.1	Affiche la barre d'action :	35
3.5.2	Paramètre du problème :	36
3.5.3	Le choix des matériaux et des milieux:	36
3.5.4	Informations importantes:	37
3.6	Étapes de modélisation d'un problème :	37
3.7	Modélisation du moteur asynchrone par la MEF :	38
3.8	Effet des différents paramètres sur le couple:	43
3.8.1	Effet de l'entrefer sur le couple:	43
3.8.2	Effet de la largeur de la bobine sur le couple:	44
3.8.3	Effet de l'intensité du courant sur le couple:	45
3.8.4	Effet de l'épaisseur d'aluminium sur le couple:	46

Chapitre 4 : Application de la méthode réseaux de neurones:

4.1	Introduction:	48
4.2	Les domaines d'application des réseaux neuronaux:	48
4.3	Un réseau de neurones: composition	48
4.4	Types de réseaux de neurones:	49
4.4.1	Réseaux de neurones Feed forwarded :	49
4.4.2	Réseaux de neurones récurrent (RNN) :	50
4.4.3	Réseaux de neurones auto-organisés :	51
4.5	Étapes de travail dans cette partie:	51
4.6	Illustration montrant le travail du réseau neuronal (l'entrée et la sortie):	51
4.7	Calcul du couple dans le programme FEMM:	52
4.8	Écriture d'un programme Matlab:	54
4.9	Vérification des résultats	55
4.10	Apprentissage du RN et exploitation:	56
4.11	Conclusion:	59
	Conclusion générale :	59

- Bibliographie
- Annexes

Liste des figures:

Figure 1-1 : La conversion d'énergie par les machines électriques.	2
Figure 1-2: Constitution La machine à courant continu.	3
Figure 1-3 : inducteur.	4
Figure 1-4 : induit.	4
Figure 1-5 : Le collecteur et les balais	5
Figure 1-6: Les différents types de machines à courant continu.	6
Figure 1-7 : Bilan des puissances.	7
Figure 1-8 : Constitution d'une machine synchrone.	9
Figure 1-9 : Machine à pôles lisse	10
Figure 1-10: Machines à pôles saillants.	11
Figure 1-11: Une illustration du moteur	11
Figure 1-12: Une illustration de génératrice	12
Figure 1-13: machine asynchrone.....	14
Figure 1-14: Symbole moteur et générateur.	14
Figure 1-15: Courbe de couple avec la fonction de fréquence de rotation.....	15
Figure 1-16:Machine à réluctance monophasée	16
Figure 1-17:Mouvement de rotation d'un MRV.	17
Figure 1-18:MRV à stator lisse.	17
Figure 1-19:Structure d'une machine à disque imbriqués.	18
Figure 1-20: Tôles stator et rotor.....	18
Figure 2-1: les différentes parties de la machine asynchrone.....	21
Figure 2-2:Modèle équivalent unifilaire d'une machine asynchrone à cage simple.	21
Figure 2-3: Photo du stator d'une machine asynchrone.	22
Figure 2-4: Photo du rotor d'une machine asynchrone.	23
Figure 2-5:Moteur asynchrone à cage d'écureuil.	24
Figure 2-6:Principe de fonctionnement.	26
Figure 2-7:Mesure de la puissance absorbée par la méthode des 2 Wattmètres	27
Figure 2-8:Le bilan des puissances.....	31
Figure 2-9:Couplage du moteur asynchrone.	32
Figure 3-1:Principaux types d'éléments utilisé en 2D.	34
Figure 3-2:Connectez-vous au programme FEMM.	35
Figure 3-3:La barre des tâches apparaît.....	35
Figure 3-4:Tableau des informations sur les problèmes.....	36

Figure 3-5:Définition des matériaux utilisés dans le problème.....	36
Figure 3-6:Boîte de dialogue propriété de bloc.....	37
Figure 3-7: Une illustration des propriétés techniques.....	39
Figure 3-8: Maillage et Zoom de Maillage.....	40
Figure 3-9: Le résultat avec ,Nodes 14308 et Elements 28254.....	41
Figure 3-10: Étapes Calcul du couple . Égal (1.7).....	41
Figure 3-11: Les vecteurs de l'induction magnétique.....	42
Figure 3-12: Dégradé de couleur de l'induction magnétique.....	42
Figure 3-13: Induction magnétique dans (le moteur) En unité de Tesla.....	43
Figure 3-14: Entrefer distance entre l'inducteur et l'induit.....	43
Figure 3-15: Effet de l'entrefer sur la couple.....	44
Figure 3-16: Angle de fente de bobine pour bobine.....	44
Figure 3-17: courbe Effet Angle d'incision sur la couple.....	45
Figure 3-18: courbe Effet L'intensité de courant sur la couple.....	46
Figure 3-19: Épaisseur d'aluminium entre interferr et retrore.....	46
Figure 3-20: courbe Effet Épaisseur d'aluminium sur la couple.....	47
Figure 3-21: Induction magnétique en (motor) une sélection circulaire, l'unité est Tesla.....	47
Figure 4-1:réseau de neurones est en général.....	49
Figure 4-2: Le réseau neuronal direct est masqué à une seule couche.....	50
Figure 4-3: Le réseau neuronal direct est multicouche.....	50
Figure 4-4:Une illustration des étapes de travail Par le réseau neuronal.....	51
Figure 4-5:étapes Réseaux de neurones sur programme Matlab.....	54
Figure 4-6:Courbe de résultats du programme de réseau neuronal.....	56
Figure 4-7: Programme pour l'apprentissage du RN.....	59
Figure 4-8: Résultat du couple obtenu par RN.....	60

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques du moteur étudié.	41
Tableau 2 : Effet de l'entrefer sur la couple.	45
Tableau 3 : Effet Angle de la bobine sur la couple.	45
Tableau 4 : Effet du courant sur la couple	47
Tableau 5 : Effet Épaisseur d'aluminium sur la couple.	38
Tableau 6 : Les valeurs de couple pour la fréquence à 2Hz et 10Hz	54
Tableau 7 : Les valeurs de couple pour la fréquence à 20Hz et 50Hz et 60Hz.	53
Tableau 8 : résultats de couple pour 100 valeurs.	55
Tableau 9 : Le couple(résultats d'apprentissage) pour 25 valeurs.	57

Liste des symboles

- Φ : flux magnétique crée sous un pôle par l'inducteur.
- Ω : vitesse de rotation (en rad/s).
- k : constante qui dépend de la machine considérée *sans unités*
- T_{em} : couple électromagnétique (en Nm)
- I : courant d'induit (en A)
- $P_{méca}$: Puissance mécanique en watts [W] .
- C : Moment du couple mécanique en newton-mètre[Nm].
- $P_{élec}$: Puissance électrique en watts [W].
- U : La tension en volts [V].
- η : Rendement de l'induit du moteur [*sans unités*].
- P_u : La puissance utile en watts [W]
- P_a : La puissance absorbée en watts[W]
- f : Fréquence (en Hz).
- N : vitesse de rotation en (tr/s)
- p : Nombre de paires de pôles. *sans unités*
- Ω_s : vitesse synchrone de rotation du champ tournant en rad/s.
- ω_s : Pulsation des courants alternatifs en rad/s.
- N_s : vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant (tr/s).
- g : Le glissement du moteur asynchrone en pourcentage [*sans unités*] .
- P_a : La puissance active absorbée en watts [W].
- P_1 : La lecture du premier wattmètre [*sans unités*].
- P_2 : La lecture du second wattmètre [*sans unités*].
- Q : La puissance réactive absorbée en V.A.R [vars].
- V.A.R : Volts ampères réactifs.
- S : La puissance apparente du moteur en V.A [VA] .
- φ : L'angle de déphasage entre courant et tension en radians [rd].
- U_s : La tension entre deux phases en volts [V].
- I_s : L'intensité du courant de ligne en ampères [A] .
- P_{js} : Les pertes par effet Joule dans le stator en watts [W].
- R_s : La résistance entre deux bornes de phases en ohm[Ω].
- I_s^2 : L'intensité du courant de ligne en ampères² [A²].
- r_s : La résistance d'un enroulement en Ohm.s [Ω] .
- J_s : L'intensité du courant dans un enroulement en Ampères² [A²].
- P_{fs} : Les pertes dans le fer du stator en watts [W]
- P_{tr} : La puissance transmise au rotor en watts [W]
- Ω_s : La vitesse angulaire du champ \vec{B} en radians par seconde [rad.s-1 Ω]]
- P_{fr} : Les pertes dans le fer du rotor en watts [W]
- p_m : Les pertes mécaniques dans le rotor en watts [W].
- γ : Le moment du couple électromagnétique[Nm]
- P_u : la puissance utile[W]

Introduction générale:

Les avancées technologiques réalisées dans le domaine du génie électrique apportent une évolution très remarquable dans le domaine des entraînements électriques, où le moteur asynchrone est de plus en plus employé. De par sa construction, la machine asynchrone est la plus robuste et la moins chère du marché, un intérêt de plus en plus croissant lui est accordé. Les progrès réalisés en commande tant dans le domaine de l'électronique de puissance que dans celui de la microélectronique, ont rendu possible l'implantation de commande performante de cette machine faisant d'elle une concurrente redoutable dans le secteur des entraînements électriques.[25]

- Le premier chapitre donnera également un aperçu des moteurs électriques de différents types de moteurs AC.
- Et deuxième chapitre une brève étude du moteur asynchrone et du principe de fonctionnement
- Dans le troisième chapitre, modéliser le moteur asynchrone à l'aide du femm et calculer le couple à chaque fois en modifiant certaines propriétés d'ingénierie telles que (entrefer, épaisseur d'aluminium, ...) et d'autres comme la fréquence et l'intensité du courant etc. Et avec le traçage des courbes changent
- Dans le chapitre quatre, nous avons utilisé le modèle de moteur asynchrone femm et avons pris les résultats et les avons transformés en un tableau et les avons utilisés dans le réseau neuronal afin d'entraîner le moteur à donner des résultats corrects pour le couple

L'objectif principal de la première étape qui a été déterminée est d'évaluer le couple électromagnétique produit dans un moteur asynchrone. Le calcul sera effectué au moyen du logiciel de modélisation FEMM (méthode magnétique par éléments finis)

La deuxième partie est l'utilisation des résultats de couple FEMM dans le réseau neuronal pour l'apprentissage, puis la prédiction du couple électromagnétique.

Chapitre 1 : Généralités sur les moteurs électriques

1.1 Introduction :

En général un moteur électrique est une machine électromécanique a pour fonction de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique. Tous les moteurs électriques sont réversibles. Il est capable de produire un courant électrique s'il est mis en rotation par des moyens mécaniques. Le moteur électrique à courant alternatif peut devenir un générateur de courant alternatif, et le moteur électrique à courant continu peut également être utilisé comme dynamo. La plupart des moteurs électriques sont rotatifs, mais il existe également des moteurs linéaires.

1.2 Classification des machines électriques:

Dans les machines électriques peuvent être trouvées en trois catégories montré dans la figure 1.1 :

- Générateurs : qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique
- Moteurs : qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique
- Convertisseurs statiques: qui transforment l'énergie électrique en énergie électrique.[1]

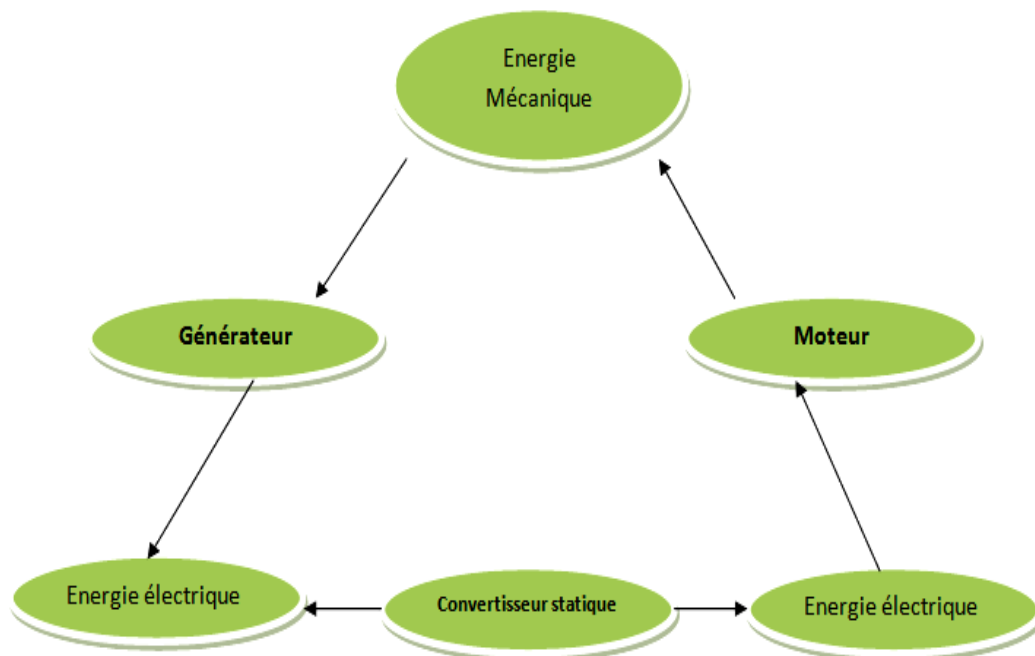


Figure 1.1 : La conversion d'énergie par les machines électriques.

1.3 La machine à courant continu :

La machine à courant continu est un convertisseur d'énergie, totalement réversible, elle peut fonctionner soit en moteur, convertissant de l'énergie électrique en énergie mécanique, soit en génératrice, convertissant de l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans les deux cas un champ magnétique est nécessaire aux différentes conversions. Cette machine est donc un convertisseur électromécanique. [2]

Ce moteur est utilisé plutôt pour les petites puissances. Ce moteur est facile à piloter en variation de vitesse. Son principe de fonctionnement repose sur la force de Laplace. La machine à courant continu est constituée de trois parties principales l'inducteur, l'induit et le dispositif collecteur / balais.

1.3.1 Constitution:

Un circuit magnétique comportant une partie fixe le stator une partie tournant le rotor et l'entrefer l'espace entre les deux parties la figure 1.2. une source de champ magnétique nommée l'inducteur (le stator) crée par un bobinage ou des aimants permanents. un circuit électrique induit (le rotor) subit les effets de ce champ magnétiques

le collecteur et les balais permettent d'accéder au circuit électrique rotatif.[3]

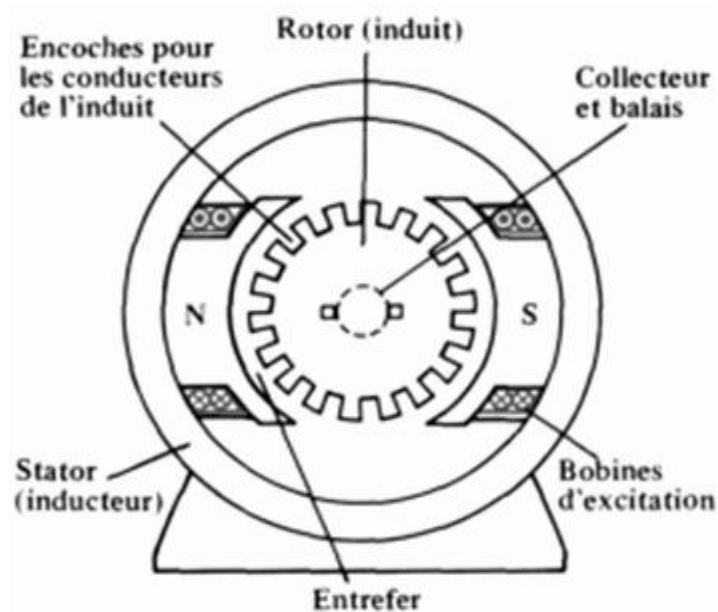


Figure 1.2: Constitution La machine à courant continu.[3]

1.3.2 L'inducteur (ou circuit d'excitation) :

C'est un aimant ou un électroaimant (bobinage parcouru par un courant continu). Il est situé sur la partie fixe de la machine (le Stator) Montré dans la figure 1.3 :



Figure 1.3: inducteur.[4]

Il sert à créer un champ magnétique (champ "inducteur") dans le rotor.

1.3.3 L'induit (circuit de puissance) :

Le noyau d'induit est en fer pour canaliser les lignes de champ, les conducteurs sont logés dans des encoches sur le rotor, deux conducteurs forment une spire Montré dans la Figure 1.4, L'induit est situé au rotor (partie tournante de la machine):



Figure 1.4: Une image de la partie mobile ou induit.[5]

1.3.4 Le collecteur et les balais :

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre où sont reliées les extrémités du bobinage de l'induit. les balais (ou charbons) sont situés au stator et frottent sur le collecteur en rotation. le dispositif collecteur / balais permet donc de faire circuler un courant dans l'induit La Figure 1.5 , suivante montre les détails:

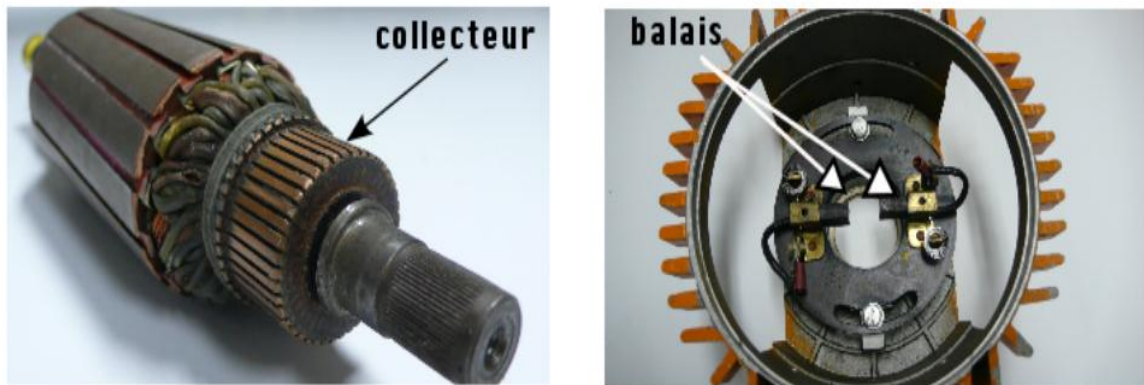


Figure1.5: Le collecteur et les balais .[6]

1.3.5 Expression de la FEM induite :

Loi de Faraday

$$E = k \Phi \Omega \quad (1.1)$$

- E : FEM induite (tension continue en V).
- Φ : flux magnétique crée sous un pôle par l'inducteur.
- Ω : vitesse de rotation (en rad/s).
- k : constante qui dépend de la machine considérée.[7]

1.3.6 Expression du couple électromagnétique :

Loi de Laplace :

$$T_{em} = k' \Phi I \quad (1.2)$$

- T_{em} : couple électromagnétique (en Nm)
- I : courant d'induit (en A)
- k' : constante qui dépend de la machine

1.3.7 Conversion de puissance :

La puissance électromagnétique mise en jeu a deux formes :

$$P_{méca} = C.\Omega \quad (1.3)$$

- $P_{méca}$: Puissance mécanique en watts [W] .
- C : Moment du couple mécanique en newton-mètre [Nm].
- Ω : La vitesse angulaire en radians par seconde [rad. s⁻¹]. [7]

$$P_{élec} = U.I \quad (1.4)$$

- $P_{élec}$: Puissance électrique en watts [W].
- U : La tension en volts [V].
- I : L'intensité du courant en ampères [A].

1.3.8 Les différents types de machines à courant continu :

Suivant l'application, les bobinages du l'inducteur et de l'induit peuvent être connectés de manière différente. On retrouve en général Montré dans le figure 1.6.

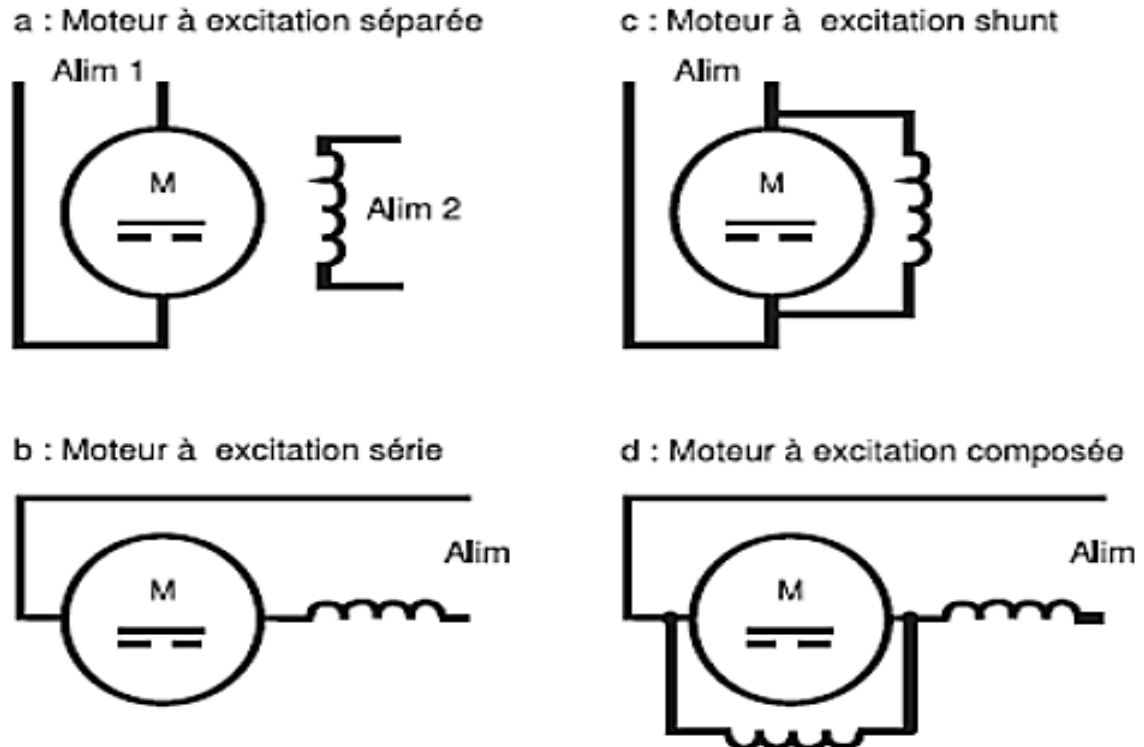


Figure1.6: Les différents types de machines à courant continu. [8]

1.3.9 Caractéristiques de chaque type:

- Parmi les caractéristiques du moteur à excitation série, on cite: Un couple de démarrage important, Une faible stabilité de vitesse et Un courant d'excitation élevé.
- Caractéristiques la Machine shunt (excitation en dérivation): Un fort couple de démarrage et une instabilité de vitesse et l'absence de l'emballement.
- Caractéristiques la Machine compound (excitation composée): Un couple de démarrage plus fort, il a une meilleure stabilité et peut fonctionner à faible charge sans risque d'emballement.
- Caractéristiques la Machine à excitation indépendante : Une plage de régulation de vitesse très grande et Une linéarité tension/vitesse, courant/couple.[9]

1.3.10 Bilan des puissances d'un moteur à courant continu :

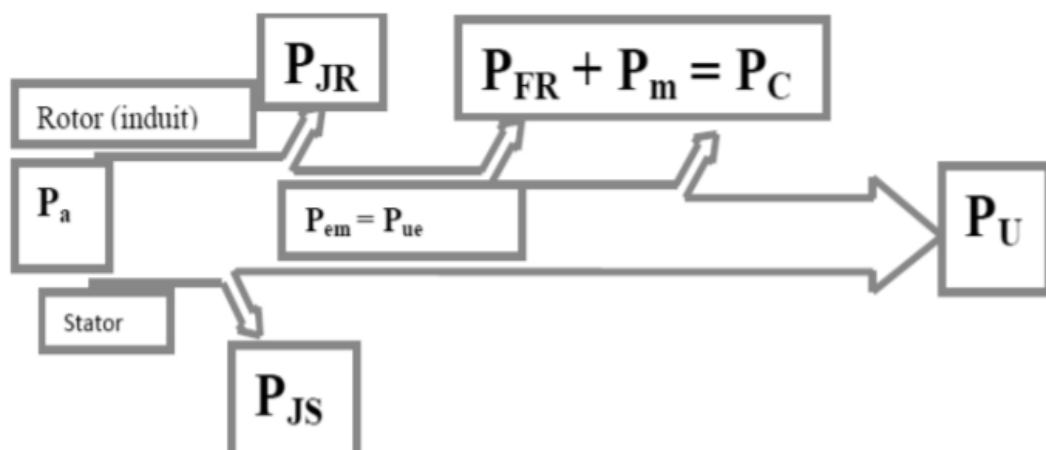


Figure1.7 : Bilan des puissances.[4]

Avec:

- P_a : puissance absorbée. [W].
- P_u : puissance utile. [W].
- P_{em} : puissance électromagnétique. [W].
- P_{JS} : pertes par effet joule dans l'inducteur. [W].
- P_{JR} : pertes par effet joule dans l'induit. [W].
- P_c : pertes collectives (pertes fer + pertes mécaniques : dites pertes constantes) [W].

1.3.11 Le rendement :

Le rendement est le rapport entre la puissance mécanique utile et la puissance électrique absorbée par l'induit, d'où :

$$\eta = \frac{Pu}{Pa} \quad (1.5)$$

- η : Rendement de l'induit du moteur [*sans unités*].
- Pu : La puissance utile en watts [W].
- Pa : La puissance absorbée en watts [W]. [10]

1.3.12 Les tensions les plus utilisées sont 12 et 24 V, dont certains avantages sont :

- Installation facile.
- Commande de vitesse dans une large gamme
- Démarrage, arrêt, marche arrière et accélération rapides
- Couple de démarrage élevé
- Courbe couple-vitesse linéaire
- Les moteurs c.c. sont largement utilisés, et ce avec de petits appareils et outils jusqu'aux palans, ascenseurs et véhicules électriques.[10]

1.4 Machine synchrone :

1.4.1 Présentation de la machine synchrone :

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines à courant alternatif dont la vitesse de rotation, en régime permanent se trouve en étroite relation avec la fréquence de l'enroulement statorique. Par conséquent, pour une fréquence donnée de l'enroulement statique, la vitesse de rotation de la machine synchrone reste constante et ne dépend pas de la valeur de la charge. Une telle définition de la machine synchrone suppose que le champ magnétique dans le circuit est créé à partir d'une source à courant continu

Donc, toute machine électrique dont laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'une tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être générer soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation, cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.[11]

1.4.2 Le domaine principal d'utilisation de la machine synchrone :

Le domaine principal d'utilisation de la machine synchrone reste la production d'énergie électrique. Quant au domaine d'utilisation des moteurs synchrones il est très étendu. Il va des entrainements des bandes, (de quelques watts) aux entrainements de grande puissance (pompes, propulsion de bateaux, générateurs à vitesse variable, traction de quelques MW de puissance) en passant par les servomoteurs de la robotique. La machine synchrone peut être également utilisée pour améliorer le facteur de la puissance d'un réseau électrique (compensateur synchrone) en participant à la régulation de la puissance réactive du réseau.[12]

1.4.3 Constitution d'une machine synchrone :

La machine synchrone se compose d'une partie tournante, le rotor, et d'une partie fixe, le stator.

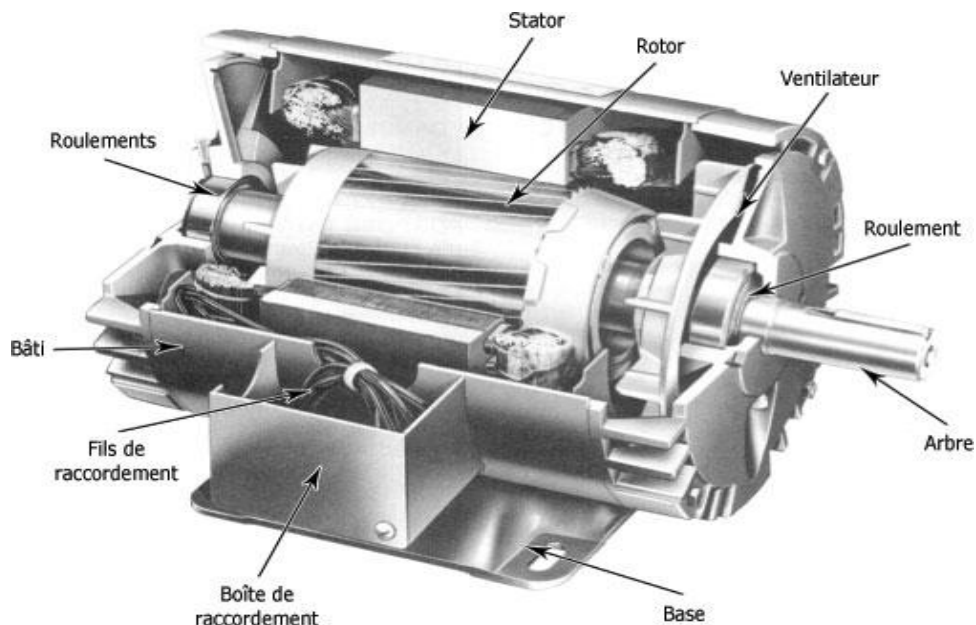


Figure1.8: Constitution d'une machine synchrone.[13]

- **Stator :**

Appelé aussi induit, c'est la partie fixe de la machine. Les conducteurs de l'induit sont placés dans des encoches autour de la carcasse de la machine et sont groupés en bobine. Les enroulements du stator sont le siège de courant alternatif monophasé ou triphasé, ils possèdent donc le même nombre de pair de pôles (p). Dans une machine synchrone bipolaire, le stator comporte 3 bobines identiques décalées de 120° .

- **Rotor :**

Appelé aussi inducteur, c'est la partie mobile de la machine. Il porte p pôles nord et p pôles sud intercalés. Les bobines créant ces pôles sont alimentés en courant continu pour créer le flux inducteur. La différence réside dans la technologie de construction ou la structure basique du rotor : cylindrique à entrefer constant ou "rotor à pôles lisses", rotor à pièces polaires distinguées le long de l'entrefer ou "rotor à pôles saillants". Le choix d'une structure ou l'autre est lié à la vitesse d'entraînement du rotor qui est inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles. [12]

1.4.4 Types de machines synchrones :

Les machines synchrones ont toutes un stator portant sur la face tournée vers l'entrefer un bobinage triphasé à $2p$ pôles. C'est dans ce bobinage que sont induites les forces électromotrices des enroulements triphasés. Notons que ce stator est constitué par un empilement de tôles (réalisées dans un matériau à haute perméabilité magnétique) de manière à réduire le plus possible l'effet des courants de Foucault.

En revanche, on distingue deux types de machines synchrones, en fonction de la structure du rotor. Le stator des deux types de machines est théoriquement le même sauf que son diamètre pour les machines à pôles saillants est supérieur.

- **Machine à pôles lisse :**

Lorsque sa périphérie est parfaitement lisse (à l'exception des encoches, naturellement). Dans ce cas la réluctance du circuit magnétique, entre rotor et stator est pratiquement constante et indépendante de la position du rotor.

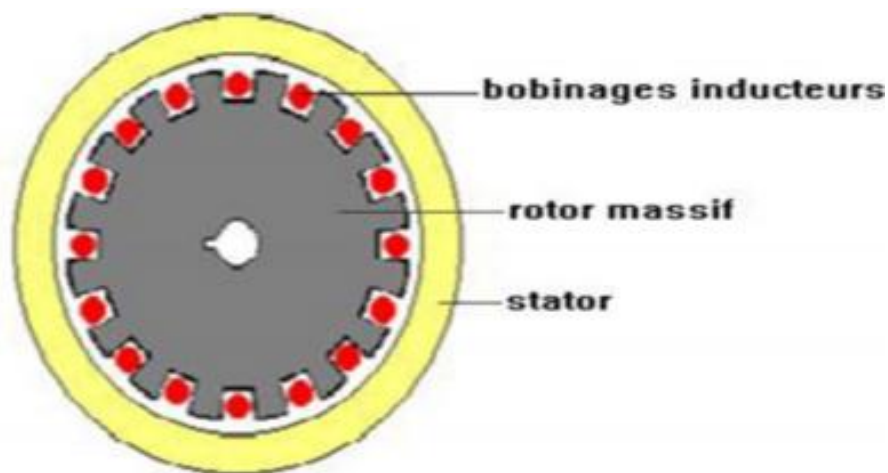


Figure1.9: Machine à pôles lisse .[14]

➤ **Machines à pôles saillants :**

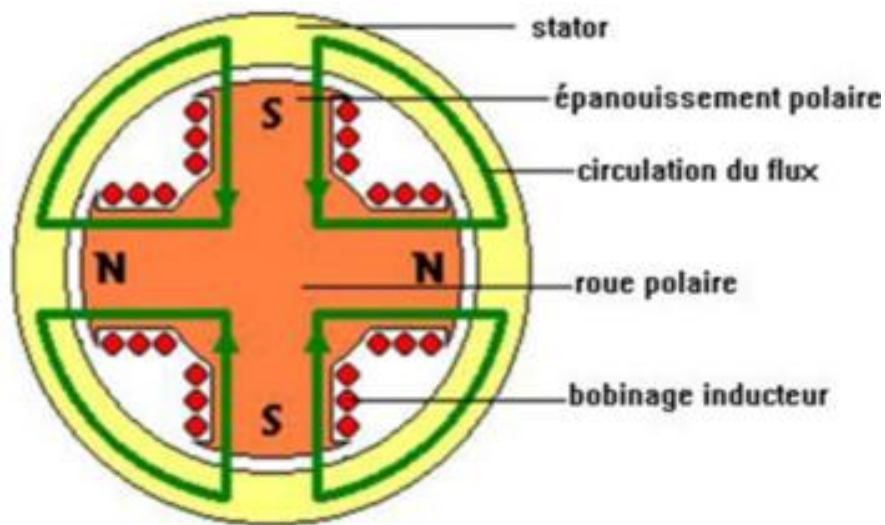


Figure1.10: Machines à pôles saillants. [14]

1.4.5 Types de fonctionnement

➤ **Fonctionnement en moteur**

Le moteur alimenté en triphasé tourne, figure1-11 montre une illustration d'une méthode de travail d'une machine synchrone avec le courant i et une source de tension triphasée.

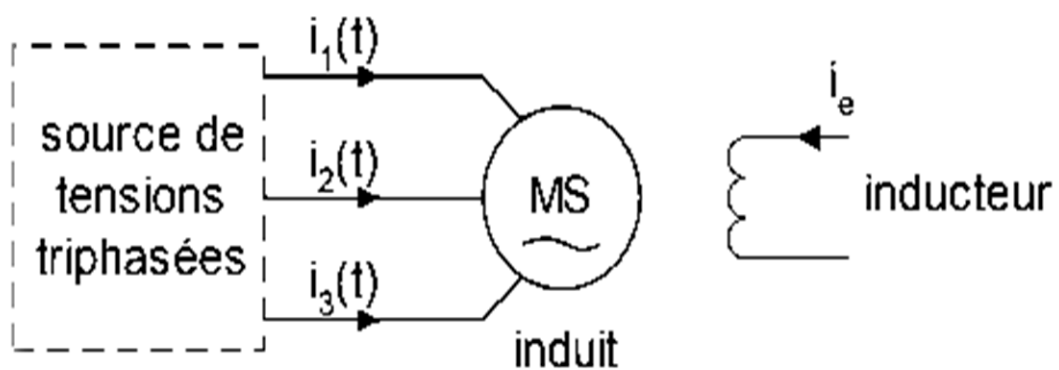


Figure1.11: Une illustration du moteur.[15]

Ex. moteurs synchrones des TGV ou Train Grande Vitesse.

➤ Fonctionnement en génératrice : alternateur

La génératrice synchrone est plus connue sous le nom d'alternateur. La figure 1-12 montre une illustration d'un procédé de travail d'une machine synchrone, d'un générateur avec courant i et d'une source de tension triphasée.

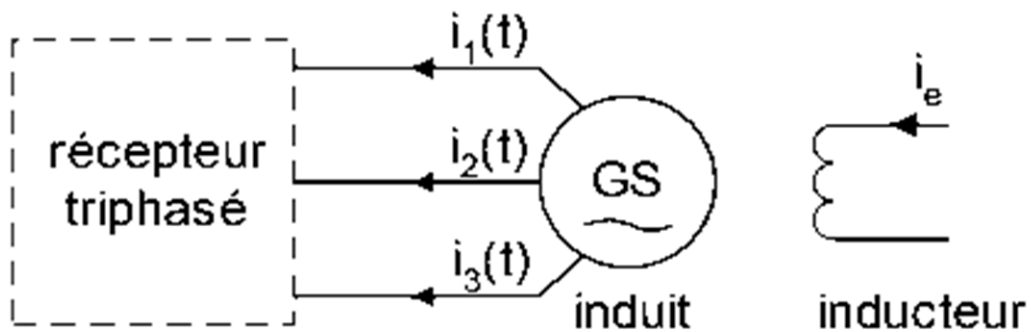


Figure 1.12: Une illustration de génératrice [15]

1.4.6 Relation vitesse-fréquence :

Le stator alimenté par un système de tensions triphasé crée un champ tournant dans l'entrefer. Ce champ magnétique tourne à la vitesse $\frac{f}{p}$ tours par secondes avec f fréquence d'alimentation des bobinages statoriques, et p le nombre de paires de pôles. Le rotor composé d'aimants permanents va alors s'aligner avec le champ tournant. Le rotor tourne ainsi à la même que le champ tournant. La vitesse de rotation du rotor est donc :

$$N = \frac{f}{p} \quad (1.6)$$

- f : Fréquence (en Hz).
- N : vitesse de rotation en (tr/s).
- p : Nombre de paires de pôles.[14]

1.5 La machine asynchrone :

La machine asynchrone est très utilisée dans les applications industrielles, car de par sa conception, son coût est relativement moindre à celui des autres machines, sa robustesse au niveau électromagnétique est grande, et une bonne standardisation existe entre les différents fabricants. Cependant, la simplicité de conception de cette machine cache une complexité fonctionnelle assez importante. La machine asynchrone a longtemps été

fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique.[16]

1.5.1 Définition :

Une machine asynchrone est une machine à courant alternatif pour laquelle la vitesse de rotation de l'arbre est différente de la vitesse de rotation du champ tournant. La machine qui nous intéresse dans ce mémoire est plus précisément une machine à induction la figure1-13. Il existe en effet théoriquement d'autres types de machines asynchrones. Une machine à induction est une machine asynchrone dont le circuit magnétique est associé à deux, ou plus de deux, circuits électriques se déplaçant l'un par rapport à l'autre et dans lequel l'énergie est transférée de la partie fixe à la partie mobile, ou inversement, par induction électromagnétique. Cependant, la seule machine asynchrone qui ait une importance pratique est la machine à induction.[17]

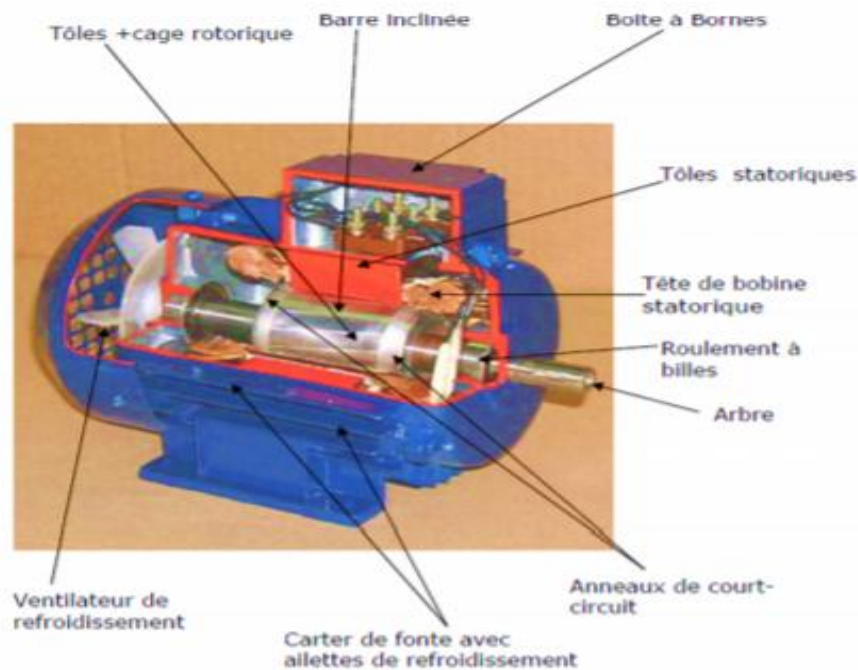


Figure1.13: machine asynchrone. [16]

1.5.2 Rôle :

Dans les machines électriques peuvent être trouvées deux catégories :

- Générateurs : qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Moteurs : qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique.[18]

1.5.3 Symbole :

La machine asynchrone peut être représentée par son symbole normalisé général qui précise si elle fonctionne en moteur ou en générateur, la Figure 1-14 suivante montre ceci.

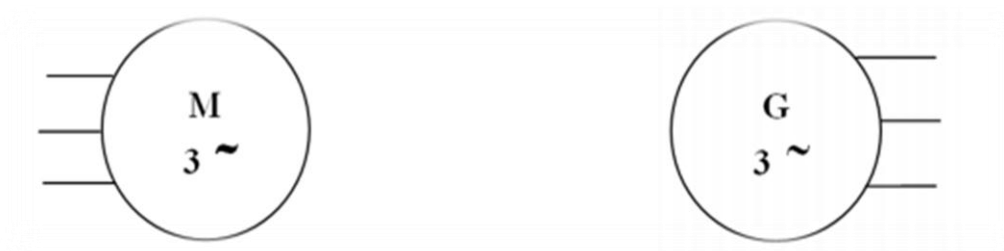


Figure 1.14: Symbole moteur(M) et générateur(G). [17]

1.5.4 Construction :

La machine asynchrone comporte une partie fixe constituée d'une carcasse à l'intérieur de laquelle sont logés le circuit magnétique et le bobinage du stator d'une part, et une partie mobile appelée rotor d'autre part.

1.5.5 Différentes caractéristiques de la machine asynchrone :

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique B_1 tournant à la pulsation de synchronisme : [19]

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \omega_s = 2\pi f. \quad (1.7)$$

- Ω_s : vitesse synchrone de rotation du champ tournant en rad/s.
- ω_s : Pulsation des courants alternatifs en rad/s.
- p : nombre de paires de pôles

1.5.6 Glissement :

Le rotor tourne à la vitesse Ω plus petite que la vitesse de synchronisme Ω_s . On dit que le rotor glisse par rapport au champ tournant. Ce glissement g va dépendre de la charge

$$g = (N_s - N) / N_s = (\Omega_s - \Omega) / \Omega_s. \quad (1.8)$$

- N_s : vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant (tr/s).
- N : vitesse de rotation du rotor (tr/s).

Avec :

$$\Omega_s = 2\pi \cdot N_s \cdot \Omega = 2\pi \cdot N \quad (1.9)$$

1.5.7 Le couple :

Le couple ($N.m$) varie avec la fréquence de rotation (tr/min) du moteur accouplé à la charge entraînée (supposée fixe) . Les caractéristiques du moteur et de la charge se croisent au point de fonctionnement pour lequel les couples moteur et résistant sont identiques. D'une manière générale la Figure1.15.[20]

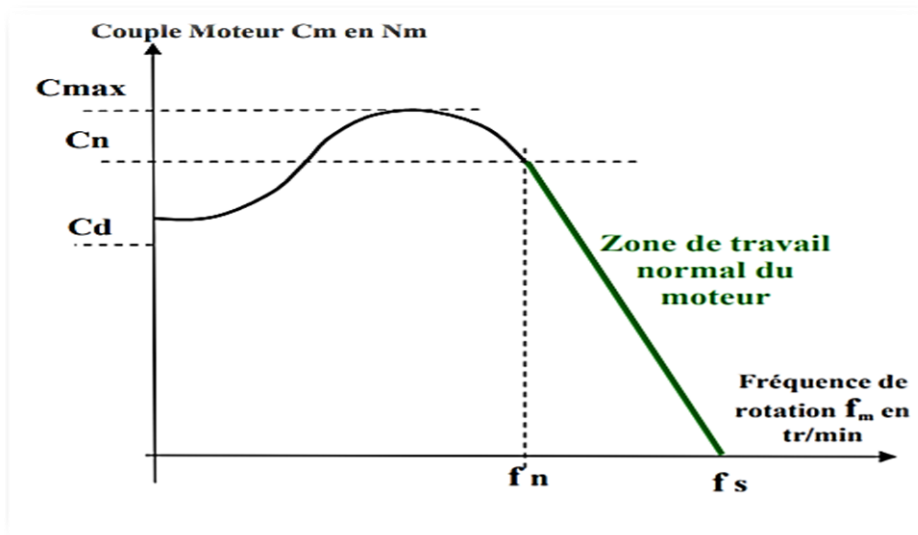


Figure1.15: Courbe de couple avec la fonction de fréquence de rotation. [21]

Avec:

- **Cn** : couple nominal (maximal en fonctionnement normal) à la fréquence de charge nominale **fn** ;
- **Cd** : couple de démarrage (à vitesse nulle) ;
- **Cmax** : couple maximal au-delà duquel le moteur s'arrête (il cale) ;
- **fn** : fréquence nominale, elle correspond à la vitesse de rotation lorsque le couple (charge) est nominal ;
- **fs** : fréquence de synchronisme, elle correspond à la vitesse de rotation à vide c'est-à-dire sous charge nulle.

1.6 Machines à réluctance variable :

Toutes les machines électriques présentent plus ou moins un effet dû à la variation de la réluctance à cause de la présence d'encoches destinées à loger les conducteurs. Cet effet, est souvent considéré comme un phénomène perturbateur par rapport au fonctionnement normal, dans les MRV la variation de la réluctance est un phénomène moteur fondamental.

1.6.1 Principe général de la réluctance variable :

Quel que soit le type de machine à réluctance variable étudié (cylindrique, linéaire, vernier à grosses dents...), le principe de fonctionnement est toujours identique si les couplages magnétiques entre phases sont négligeables. Il peut être décrit à partir de l'étude d'une structure monophasée élémentaire, identique à celle représentée la figure 1-16. Il s'agit d'un circuit magnétique simple constitué de deux pièces ferromagnétiques l'une fixe (stator) comportant un enroulement à N spires parcourues par un courant I et l'autre mobile (rotor) autour d'un axe fixe. Soit θ_m l'angle entre l'axe longitudinal de la pièce mobile et celui interpolaire de la pièce fixe.[22]

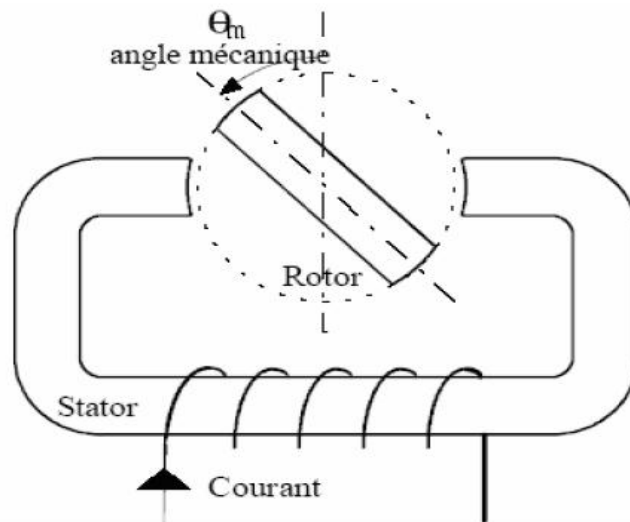


Figure 1.16: Machine à réluctance monophasée.[22].

1.6.2 Le moteur :

Les moteurs à réluctance variable appartiennent à la famille des moteurs dont l'effet moteur résulte de la variation d'énergie magnétique à fonction du déplacement du rotor par rapport du Stator. En procédant à un bilan des énergies mises en jeu, on trouve l'expression analytique de la conversion de l'énergie électromagnétique en énergie mécanique, qui peut se présenter sous la forme:

$$w = \frac{1}{2} Li^2 \quad .(1.10)$$

Ce principe valable dans le cas d'une machine polyphasée à plusieurs pôles, ici de type 6/4 (6 dents au stator et 4 dents au rotor). Ainsi, en alimentant successivement chacun des

phases, il est possible d'obtenir un mouvement de rotation continu, comme le montre la figure 1-17.[23][22]

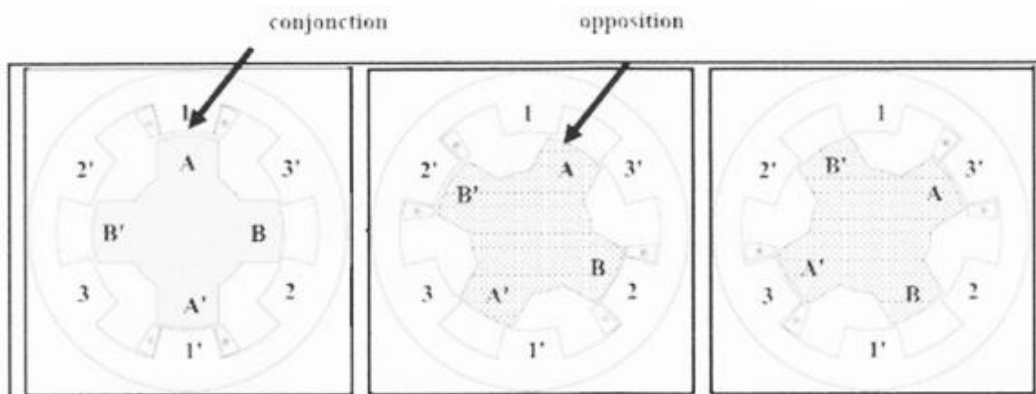


Figure1.17:Mouvement de rotation d'un MRV.[23]

L'alimentation de la phase 1 aligne (AA') avec (11'), L'alimentation de la phase 2 aligne (BB') avec (22').et l'alimentation de la phase 3 aligne (AA') avec (33'). comme on a mentionné dans la figure1-17, la réluctance magnétique est une fonction de la position du rotor et du courant i

1.6.3 Défèrents types des MRV : Il existe plusieurs types des moteur MRV ont cité :

➤ MRV à stator lisse :

Les machines à réluctance variable à stator lisse conviennent aux entraînements à puissance élevée et à grande vitesse (plus de 1000tr/min), leur bobinage d'induit est généralement triphasé. Ces machines peuvent être excitées ou non.la figure 1-18

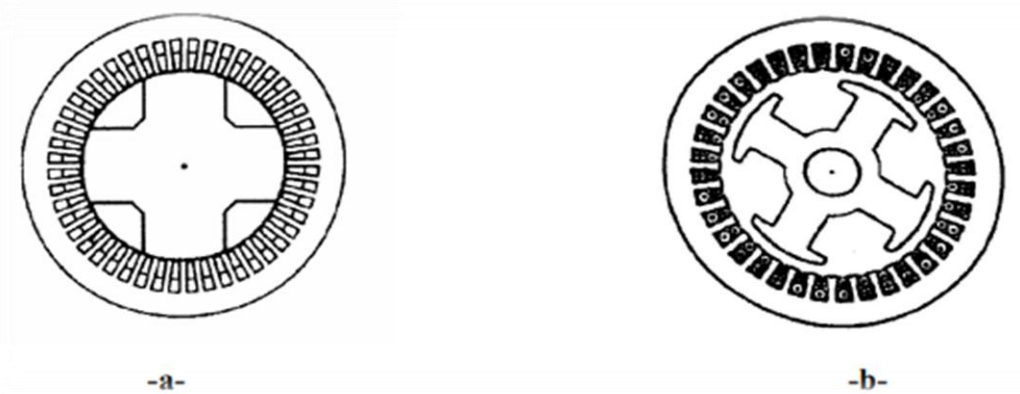


Figure1.18: MRV à stator lisse.[23]

-a- MRV à stator lissé excitée au stator. **-b-** MRV à stator lissé non excitée.

➤ **MRV à disques imbriqués :**

La MRV à disque imbriqué la figure1-19 possède deux séries identiques de disques alternativement fixés et mobiles.

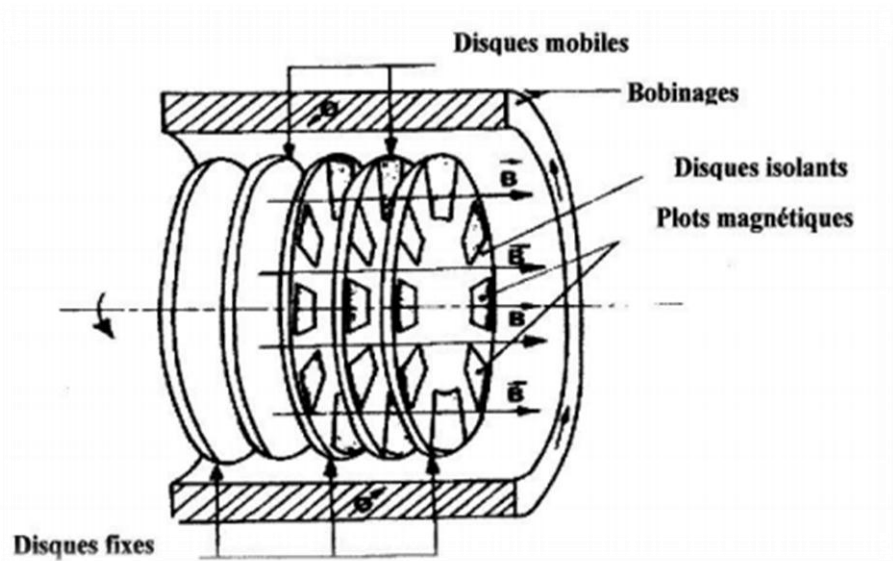


Figure1.19:Structure d'une machine à disque imbriqués.[24]

➤ **Machine à réluctance variable à double saillance :**

La machine à réluctance variable à double saillance la figure1-20 est la plus facile à construire, elle est constituée d'un empilement de tôles.

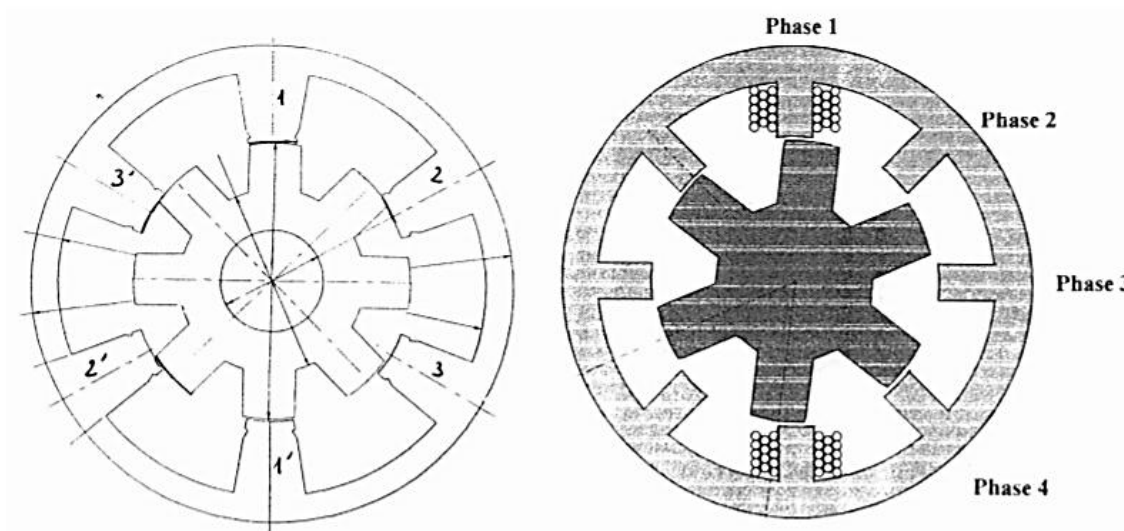


Figure1.20: Tôles stator et rotor.[25]

1.6.4 Avantage :

- Simplicité de confection.
- Machine robuste
- Possibilité de fonctionner pour des larges gammes de vitesse.
- Bon coefficient de bobinage.

1.6.5 Inconvénients :

- Présence non négligeable de bruit et de vibration.
- Rendement faible.
- Fonctionne à des fréquences élevées.

1.7 Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous présentons une étude, Informations générales sur un groupe de moteurs électriques et leurs caractéristiques et Ils diffèrent les uns des autres par leur installation et leur principe de fonctionnement (courant continu, synchrone, asynchrone et variable de réluctance) au second semestre Ce que nous consacrerons uniquement au moteur asynchrone.

Chapitre 2: Moteur asynchrone

2.1 Introduction :

Dans cette Chapitre2 nous étudierons la modélisation des moteurs asynchrones. La machine asynchrone, est une machine à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui la traversent La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. [26]

Les moteurs consomment 60 à 70% de l'énergie produite sur un réseau électrique . la majorité des moteurs utilisés dans les secteurs industriel, commercial et domestique sont des moteurs asynchrones. Il est donc important, lors d'études de stabilité de réseaux électriques, d'avoir des modèles précis représentant les machines asynchrones.[27], pour fonctionner en courant monophasé, ces machines nécessitent un système de démarrage. Pour les applications de puissance, au-delà de quelques kilowatts, les moteurs asynchrones sont uniquement alimentés par des systèmes des courants triphasés.

2.2 Constitution de la machine asynchrone :

La machine asynchrone est la machine la plus utilisée du faite qu'elle nécessite peu d'entretien, moins coûteuse, et se présente avec une construction assez simple, elle est aussi très connue par sa standardisation et sa robustesse. Sur la figure 2-1, on représente les différentes parties de la machine asynchrone.[26]

L'un des types de moteurs électriques les plus populaires est le moteur à rotor à cage asynchrone , la réparation de moteurs asynchrones nécessite des connaissances en conception et en installation

Il se compose d'une partie fixe, qui s'appelle le stator, et d'une partie tournante, qui s'appelle le rotor et le refroidissement par air se fait en faisant tourner un ventilateur centrifuge. Il est recouvert d'une cage de protection

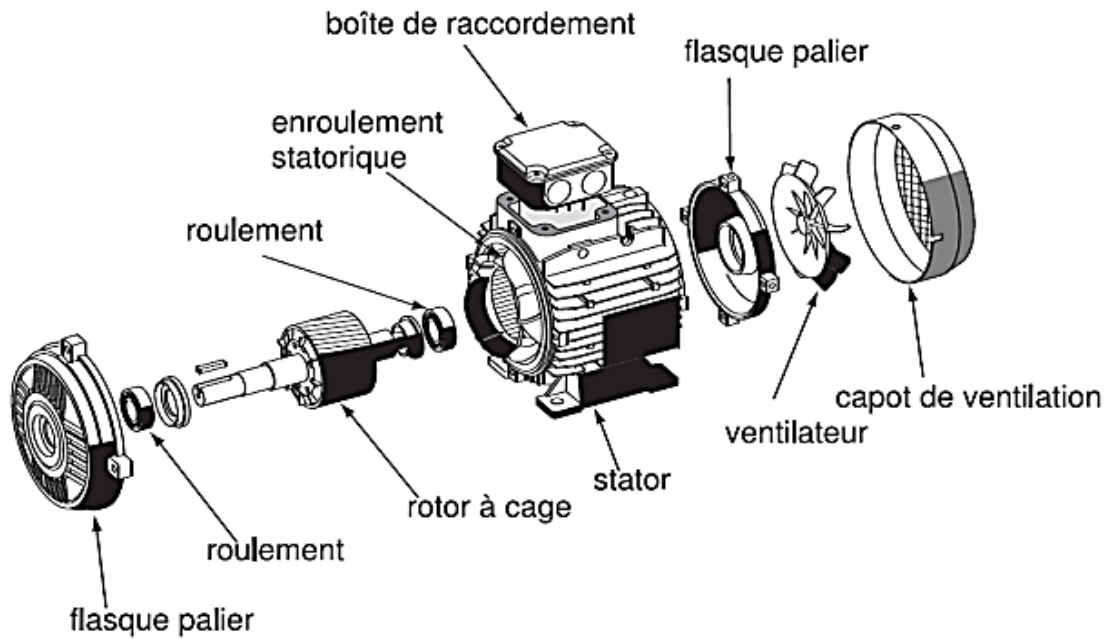


Figure2.1: les différentes parties de la machine asynchrone.[28]

2.3 Modèle équivalent:

La figure 2-2 représente le modèle unifilaire équivalent d'une machine asynchrone à cage simple. La résistance R_s et l'inductance X_s représentent respectivement la résistance et l'inductance au niveau du stator. La résistance R_m (parfois dénoté R_c) représente les pertes fer et l'inductance X_m est l'inductance de magnétisation). La résistance R_r et l'inductance X_r représentent respectivement la résistance et l'inductance au niveau du rotor.[29]

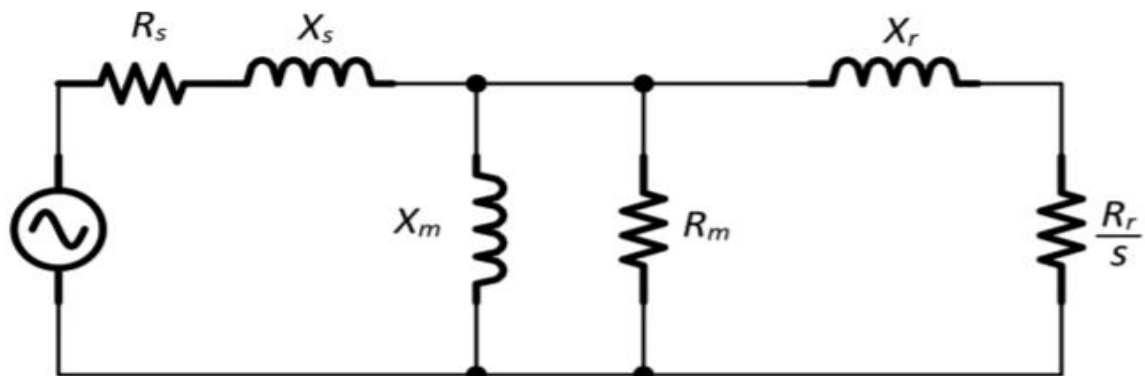


Figure2.2: Modèle équivalent unifilaire d'une machine asynchrone à cage simple.[29]

2.4 Eléments d'un moteur asynchrone :

2.4.1 Le Stator :

Le stator d'un moteur asynchrone den la Figure 2.3 est identique à celle d'un moteur synchrone (MS) 3 enroulements couplés en étoile ou en triangle et décalés entre eux de $2\pi/3$ qui sont alimentés par un système de tension équilibrées. Le stator d'un moteur triphasé (le plus courant en moyenne et grosse puissance), comme son nom l'indique, est la partie statique du moteur asynchrone. Il se compose principalement :

- De la carcasse.
- Des paliers.
- Des flasques de palier.
- Du ventilateur refroidissant le moteur
- Le capot protégeant le ventilateur.



Figure2.3: Photo du stator d'une machine asynchrone.[30]

2.4.2 Le rotor :

Le rotor du moteur supporte un bobinage semblable à celle du stator du MS, bobinage triphasé décalés de $2\pi/3$ à même nombre de pôles que celle du stator MS. Ces 3 bobinages sont couplés en étoile et court-circuités sur eux-mêmes. Ce type de rotor est dit bobiné mais on peut envisager un rotor plus sommaire constitué de barres conductrices court-circuitées par un anneau conducteur à chaque extrémité. Le rotor est la partie mobile du moteur asynchrone. Il se compose essentiellement, d'un empilage de disques minces isolés

entre eux et clavetés sur l'arbre du rotor afin de canaliser et de faciliter le passage du flux magnétique (Figure 2.4) et d'une cage d'écureuil en aluminium coulé dont les barreaux sont de forme trapézoïdale pour les moteurs asynchrones standards et fermés latéralement par deux "flasques" conductrices. [26]

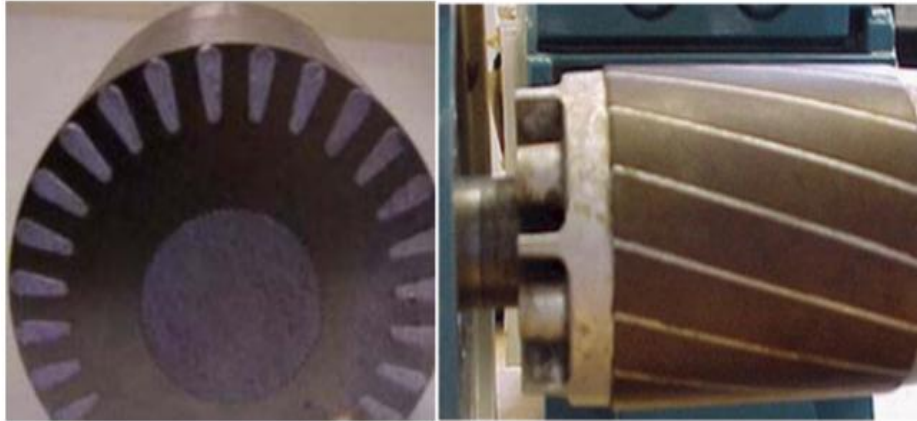


Figure2.4: Photo du rotor d'une machine asynchrone.[26]

- **Stator :**

Le stator des moteurs asynchrones triphasés est le même que celui du moteur synchrone ou de l'alternateur, c'est lui qui crée le champ tournant. Il consiste à un bâti d'acier, contenant un empilage de tôles rainurées pour recevoir les enroulements qui sont divisés en trois bobines séparées, de manière à produire chacune des phases du système triphasé.

- **Rotor :**

Dans la réalité le rotor est constitué de tôles empilées de façon à former un cylindre comportant des encoches où sont logés des conducteurs en aluminium coulé ou en cuivre dont les extrémités sont court-circuitées par des couronnes de même nature formant ainsi une "cage d'écureuil". Le rotor peut recevoir également trois enroulements identiques constitués de conducteurs en cuivre reliés à des bagues servant à les court-circuiter. On à faire dans ce cas à un "rotor bobiné"[30].

2.5 Moteur asynchrone à cage d'écureuil : (rotor en court-circuit) :

Ces rotors sont constitués de tôles ferromagnétiques et de barres conductrices régulièrement réparties à la périphérie du rotor. Les barres sont reliées entre elles par des anneaux de court-circuit. Les tôles ferromagnétiques servent à guider les lignes de champ tandis que les barres accueillent les courants d'induits. Pour les machines de faible puissance, les rotors sont réalisés à partir d'un empilement de tôles découpées et isolées les

unes des autres (feuilletage) dans lesquelles on injecte un matériau conducteur de manière à constituer les barres ainsi que les anneaux de court-circuit. Pour les machines de forte puissance. [29]

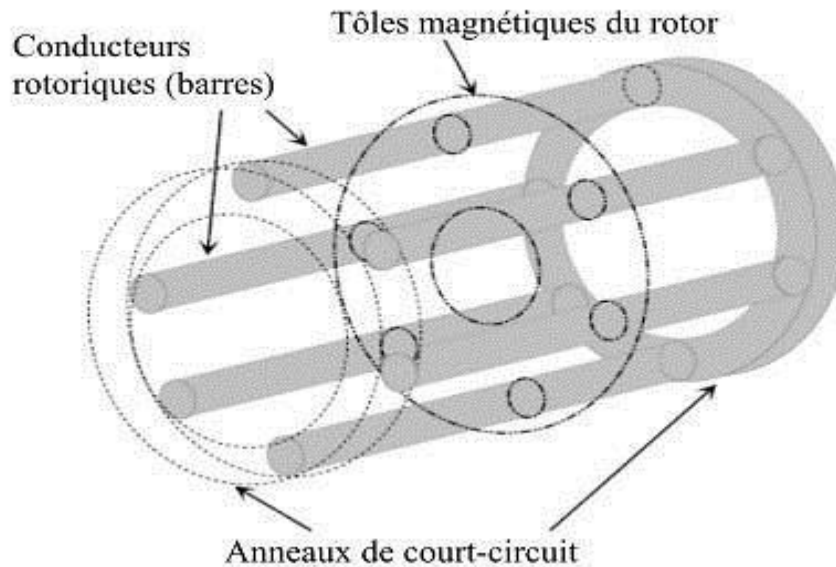


Figure 2.5: Moteur asynchrone à cage d'écureuil. [31]

2.6 Moteur asynchrone à rotor bobiné : (rotor à bague) :

Le moteur à rotor bobiné possède un bobinage triphasé relié en étoile et branché à trois résistances externes à l'aide des bagues collectrices. Ce type de moteur s'avère plus coûteux que le moteur à cage d'écureuil.

Cependant, il présente les avantages suivants :

- Le couple de démarrage est plus élevé.
- Il est possible de régler la vitesse du moteur à l'aide de résistances extérieures (rhéostats),
- Le courant de démarrage est plus faible lorsqu'on ajoute un rhéostat.

Avec l'apparition de contrôleurs électroniques de plus en plus performants, l'utilisation des moteurs à rotor bobiné tend toutefois à diminuer dans les applications à vitesse variable au profit de moteurs à cage d'écureuil associés à des Variateurs de vitesse à contrôle vectoriel de flux permettant des variations de 0 à 2 fois la vitesse de rotation nominale du moteur. Les bagues permettent d'avoir une liaison électrique avec les bobines du rotor. Le coût élevé et l'apparition des variateurs de fréquence a rendu obsolète ce type de machine.

Ci-dessous, possède des enroulements reliés à trois bagues collectrices, elles-mêmes montées sur l'arbre du moteur.

2.7 A doublé cage :

Le rotor est construit suivant le principe du rotor à cage simple, mais avec deux cages électriquement indépendantes. Une cage externe à la périphérie du rotor est composée de matériaux résistifs (laiton, bronze) et possède une faible dispersion magnétique. Une cage interne en cuivre possède une résistivité plus faible et une dispersion magnétique importante.[32]

2.8 A doublé encoches ou à encoches profondes :

Ce sont des rotors à cage qui utilisent l'effet de peau dans les conducteurs afin de faire varier la résistance du rotor en fonction de la vitesse de fonctionnement de la machine. L'effet de peau est un phénomène électromagnétique qui fait que plus la fréquence des courants augmentent, plus le courant a tendance à ne circuler qu'en surface des conducteurs.

2.9 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone :

Le fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau la figure 2.6, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant. De cette façon le fonctionnement d'une machine asynchrone est analogue à celui d'un transformateur: le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire qui, dans le cas général, peut tourner à la vitesse de rotation donnée par le rapport suivant:[26]

$$N = \frac{F \times 60}{P}. \quad (2.1)$$

- N : la vitesse de rotation.(tr/min)
- F : est la fréquence d'alimentation.(Hz)
- p : représente le nombre de paires de pôles.

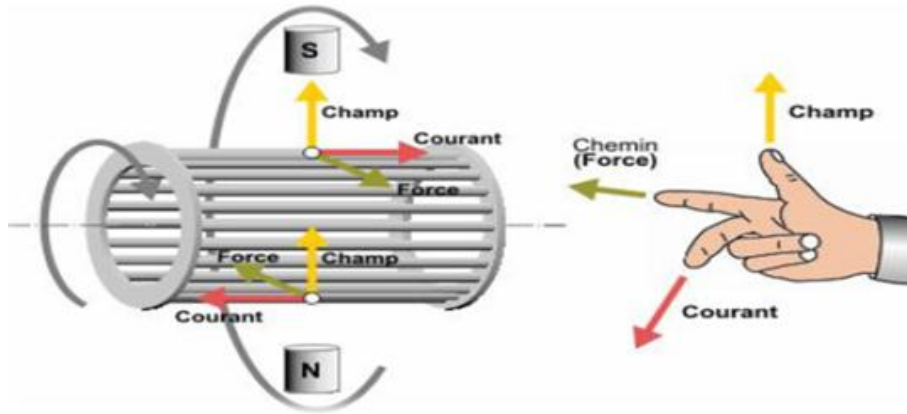


Figure2.6: Principe de fonctionnement.[33]

2.10 Glissement d'une machine asynchrone :

Le glissement est une grandeur qui rend compte de l'écart de vitesse de rotation d'une machine asynchrone par rapport à une machine synchrone hypothétique construite avec le même stator. Le glissement est toujours faible, de l'ordre de quelques pourcents : de 2 % pour les machines les plus grosses à 6 ou 7 % pour les petites machines triphasées, il peut atteindre 10 % pour les petites machines monophasées. Les pertes par effet Joule dans le rotor étant proportionnelles au glissement, une machine de qualité se doit de fonctionner avec un faible glissement.[26]

$$g = (N_s - N) / N_s. \quad (2.2)$$

- g : Le glissement du moteur asynchrone en pourcentage [sans unités] .
- N_s : La fréquence de rotation du champ B ρ en tours par seconde [tr.s-1] .
- N : La fréquence de rotation du rotor en tours par seconde [tr.s-1] .

2.11 Mesure de la puissance absorbée :

Cette méthode reste identique que le couplage soit en étoile ou en triangle. Elle utilise deux wattmètres numériques qui doivent être branchés comme suit :

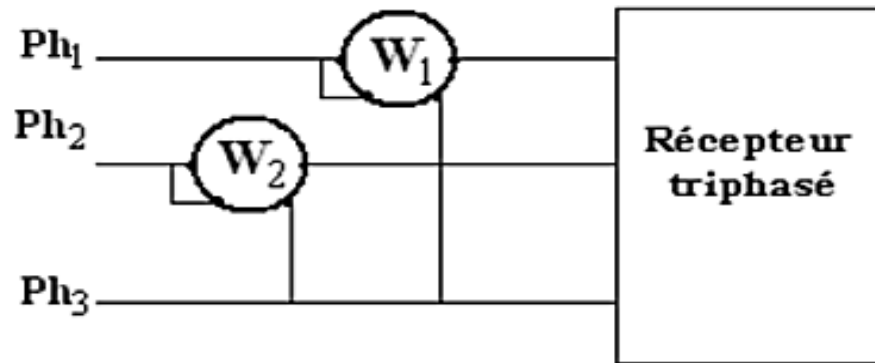


Figure2.7:Mesure de la puissance absorbée par la méthode des 2 Wattmètres.[34]

Pour cette mesure, le fil de neutre n'est jamais utilisé.

- Le premier wattmètre W1 indique une grandeur P1,
- Le second wattmètre W2 indique une grandeur P2.

➤ **La puissance active:**

La puissance active P_a absorbée par le moteur se calcule à partir des informations des wattmètres, en utilisant la relation suivante :

$$P_a = P1 + P2. \quad (2.3)$$

- P_a : la puissance active (w),
- P1 et P2 : les puissances mesurées par les wattmètres(w).

P1 et P2 sont les lectures des deux wattmètres, elles sont soit positives soit négatives. Sachant que la puissance absorbée P_a est une puissance active, elle est nécessairement positive. Il est donc indispensable de donner à P1 la valeur positive correspondant à la plus grande des deux indications en valeurs absolues. La valeur prise par P2 sera l'indication de l'autre wattmètre, affublé du signe « plus » si les deux grandeurs étaient de même signe et du signe « moins » dans le cas contraire.

➤ **La puissance réactive:**

La puissance réactive Q_a absorbée par le moteur se calcule à partir des informations des wattmètres, en utilisant la relation suivante :

$$Q_a = \sqrt{3}(P1 + P2) \quad (2.4)$$

- Q_a : La puissance réactive(VAR)

La puissance apparente du moteur peut se déduire des deux calculs précédents par la relation :[38]

$$S = \sqrt{Pa^2 + Qa^2} \quad (2.5)$$

- S : La puissance apparente (VA)

➤ **Le facteur de puissance:**

Le facteur de puissance peut se déduire des deux calculs précédents par la relation :

$$\cos \varphi = \frac{Pa}{\sqrt{Pa^2 + Qa^2}} \quad (2.6)$$

$\cos \varphi$: est le facteur de puissance.

➤ **Bilan des puissances actives:**

La puissance active appelée par le moteur au réseau est :

$$Pa = \sqrt{3}UsIs \cos \varphi \quad (2.7)$$

- Us :La tension entre deux phases en volts [V].
- I : L'intensité du courant de ligne en ampères [A] .

Le stator est le siège de pertes ferromagnétiques Pfs et de pertes par effet joule Pjs et résistance Rs est donnée entre deux bornes de phases :[38]

$$Pjs = \frac{3}{2}RsIs^2 \quad (2.8)$$

- Pjs :Les pertes par effet Joule dans le stator en watts [W].
- Rs : La résistance entre deux bornes de phases en Ohm[Ω].
- I : L'intensité du courant de ligne en ampères² [A²].
- La résistance rs est celle d'un enroulement

Couplage étoile : $Pjs = 3rsIs^2$ (2.10)

Couplage triangle : $Pjs = 3rsJs^2$ (2.11)

- Js : L'intensité du courant dans un enroulement en Ampères² [A²].

$$Pfr = Pmagnétique \quad (2.12)$$

- P_{fr} : Les pertes dans le fer du rotor en watts [W];
- $P_{magnétique}$: Puissance mécanique en watts [W];

Les pertes magnétiques, dans les tôles de l'armature du stator sont pratiquement indépendantes de la charge, elles sont liées à la valeur efficace U et à la fréquence f de la tension composée $U(t)$. Pour un réseau donnée, ces pertes sont considérées comme constantes, elles sont données, ou calculées par un essai à vide. La puissance électromagnétique transmise à travers l'entrefer est :[35]

$$P_{tr} = P_a - (P_{js} + P_{fs}) ; \quad (2.13)$$

$$P_{tr} = T\Omega_s \quad (2.14)$$

- P_{tr} : La puissance transmise au rotor en watts [W]
- P_{fs} : Les pertes dans le fer du stator en watts [W]
- T : Le moment du couple transmis au rotor en Newton-mètre [Nm] .
- Ω_s : La vitesse angulaire du champ \vec{B} en radians par seconde [rad.s^{-1}]

Le rotor est le siège de pertes ferromagnétiques P_{fr} et de pertes par effet joule P_{jr} :

$$P_{jr} = 0W \quad (2.15)$$

- P_{jr} : Les pertes dans le joule du rotor en watts [W];

Le rotor est également le siège d'un autre type de pertes. Les pertes fer ou magnétiques. Cependant ces pertes seront toujours négligées devant les autres, la fréquence des courants étant très faible.[35]

$$P_{em} = P_{tr} - (P_{jr} + P_{fr}) \quad (2.16)$$

$$P_{em} = T\Omega \quad (2.17)$$

Pour obtenir la puissance utile P_u , c'est-à-dire celle qui est utilisable par la charge entraînée, il reste à retrancher les pertes mécanique p_m

$$P_u = P_{em} - p_m \quad (2.18)$$

$$P_u = T_u \Omega \quad (2.19)$$

Avec:

- P_u : La puissance utile en watts [W]

- T_u : Le moment du couple utile disponible en Newton-mètre [Nm].
- P_{em} : La puissance électromécanique en watts [W]

Ces pertes sont considérées comme constantes, elles sont données, ou calculées par un essai à vide. Très souvent elles sont égales aux pertes dans le fer du stator, la somme de ces deux types de pertes sera communément appelée les pertes constantes.

Les pertes magnétiques dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault se produisent uniquement dans les tôles du stator. les pertes mécaniques dues aux frottements se situent au niveau des paliers du rotor.

La puissance absorbée à vide se mesure aisément avec la méthode des deux wattmètres. Connaissant la résistance des enroulements du stator, les pertes par effet Joule à vide sont facilement calculables. La différence entre la puissance absorbée et la puissance perdue par effet Joule, donne les deux puissances restantes, c'est-à-dire les pertes magnétiques au niveau du stator et les pertes mécaniques.[31]

➤ **Plusieurs études sont possibles :**

Les pertes mécaniques et les pertes magnétiques dans le stator sont égales, nous calculons alors la puissance absorbée, les pertes par effet joule dans le stator et nous en déduisons les pertes mécaniques ainsi que les pertes magnétiques dans le stator.[35]. Ce bilan permet de tracer le diagramme de puissance dans la figure 2-8. Lorsque le moteur est branché sur le réseau, le glissement en fonctionnement normal est faible. La fréquence :

$$f_r = g f_s \quad (2.20)$$

- f_r : fréquence rotoriques(Hz)
- g : le glissement
- f_s : fréquence statorique(Hz)

Des courants rotoriques est beaucoup plus petite que celle des courants statorique f_s , et les pertes ferromagnétiques au rotor sont alors négligeables. Par contre, quand le moteur est alimenté par un convertisseur électrique, ces pertes interviennent beaucoup plus. Le bilan des puissances décline toutes les puissances, depuis la puissance absorbée d'origine électrique jusqu'à la puissance utile de nature mécanique.[31]

Le bilan, peut être résumé à l'aide du schéma suivant :

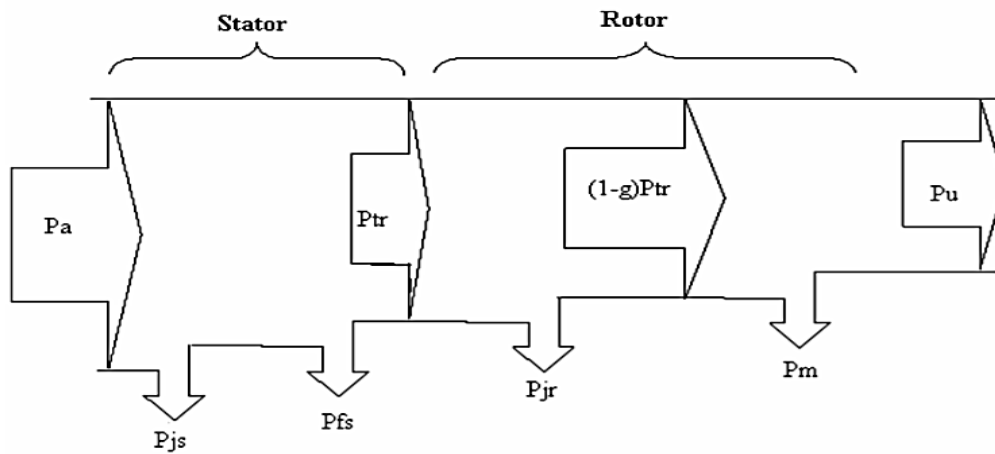


Figure2.8:Le bilan des puissances.[36]

2.12 Expression du rendement :

Les pertes fer dans le rotor sont négligées, soit :

$$P_u = P_{tr} - (p_m + p_{jr}) \quad (2.21)$$

$$\eta = \frac{(1 - g)(P_a - (p_{fs} + p_{js})) - p_m}{P_a} \quad (2.22)$$

η : Rendement du moteur.

2.13 Couplage étoile/triangle :

Pour raccorder correctement un moteur électrique, il faut déterminer le couplage des enroulements moteur en fonction de la tension réseau.

Deux couplages sont possibles :

- Couplage des enroulements en étoile
- Couplage des enroulements en Triangle

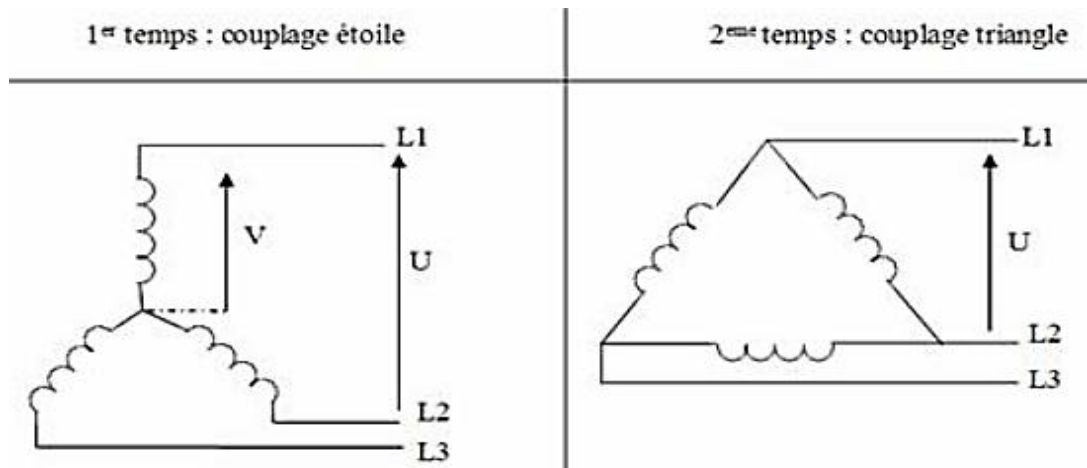


Figure 2.9: Couplage du moteur asynchrone.[37]

2.14 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone :

Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone sont assez nombreux mais les principaux sont résumés dans le tableau suivant :

2.14.1 Il ya plusieurs avantages dans le moteur asynchrone :

- Structure simple.
- Robuste et facile à construire.
- Utilisé dans la puissance moyenne et élevés.
- Relié directement aux réseaux industriels à tension et fréquence.
- Il tourne à vitesse variable différente de la vitesse synchrone.
- Il est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité de l'entraînement à vitesse.

2.14.2 Inconvénients Parmi les inconvénients de la machine asynchrone :

- Le couple de démarrage très élevé que les couples nominales.
- La vitesse dépend de la charge.
- Variation de vitesse (nécessité d'un variateur de vitesse).
- La structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un fort couplage.

2.15 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons établi une description de la machine asynchrone et sa structure (les différents types du rotor, et la considération technique). La machine asynchrone qui fait actuellement l'objet d'un intérêt accru dans plusieurs applications, ceci étant dû essentiellement à sa fiabilité, son coût relativement faible, sa robustesse et sa simplicité de construction, malheureusement sa commande est relativement complexe.

Chapitre 3 : Modélisation du MAS par le logiciel FEMM

3.1 Introduction :

La modélisation des dispositifs électromagnétiques se fait soit par des méthodes analytiques dans les cas simples ou par des méthodes numériques dans les cas complexes. Parmi les méthodes numériques les plus utilisées on trouve la méthode des différences finies (MDF), la méthode des volumes finis (MVF) et la méthode des éléments finis (MEF). Cette dernière méthode est implémentée dans le logiciel ouvert de modélisation dit FEMM. Dans ce travail, nous utiliserons le logiciel FEMM pour modéliser le moteur asynchrone, C'est l'objectif principal du le troisième chapitre.

3.2 Principe de la méthode des éléments finis:

La méthode des éléments finis peut être définie comme une méthode' approximation des équations aux dérivées partielles qui régissent les phénomènes physiques et leurs conditions aux limites.

Le principe bien connu de la méthode est de discrétiser le domaine d'étude en de multiples éléments puis de résoudre localement, dans chacun de ceux-ci, les équations associées à la formulation retenue. Les inconnues élémentaires sont alors définies par une combinaison linéaire, pondérée par des polynômes d'interpolation. la précision du calcul est liée à la finesse du maillage et au degré de ces polynômes.

Leurs coefficients ne dépendent que de la géométrie et de sa discrétisation .Finalement, on obtient après assemblage un système matriciel d'équations, pouvant tenir compte de certains non linéarités, comme celle intervenant dans les matériaux ferromagnétiques . [39]

Il y a deux variantes de la méthode des éléments finis :

- La méthode des résidus pondérés.
- La méthode variationnelle.

➤ La méthode des résidus pondérés:

La méthode des résidus pondérés est une méthode destinée à affaiblir un système d'équations pour permettre sa résolution dans le cas où celui-ci présenterait des difficultés d'ordre mathématique (discontinuités, fonction non définie, valeurs infinies ...).

➤ **La méthode variationnelle:**

Elle consiste à minimiser une fonctionnelle qui représente généralement l'énergie du système à résoudre. Pour la mise en œuvre de la méthode, il faut suivre les étapes suivantes:

- Le maillage (discrétisation du domaine).
- Choix de la fonction d'interpolation.
- Choix de la fonctionnelle.
- La minimisation : c'est-à-dire mettre le système sous la forme
- Résolution du système algébrique et résultats

3.3 Types d'éléments finis:

On peut classer, les différents types d'éléments finis suivant leur géométrie

Figure 3.1 comme suit :

- Les éléments unidimensionnels : barres, poutres rectilignes ou courbes utilisées de façon individuelle ou associées à des plaques pour modéliser les raidisseurs dans un voile;
- Les éléments bidimensionnels : élasticité plane, plaque en flexion, coques courbes, de forme triangulaire ou quadrangulaire ; f
- Les éléments tridimensionnels : éléments de volume ou coques épaisses ;
- Les éléments axisymétriques : qui constituent une classe bien particulière : tores à section triangulaire ou quadrangulaire, coques coniques ou méridienne courbe.[40]

Selon que le domaine d'étude, soit à une, deux ou trois dimensions, on rencontre le plus souvent des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques

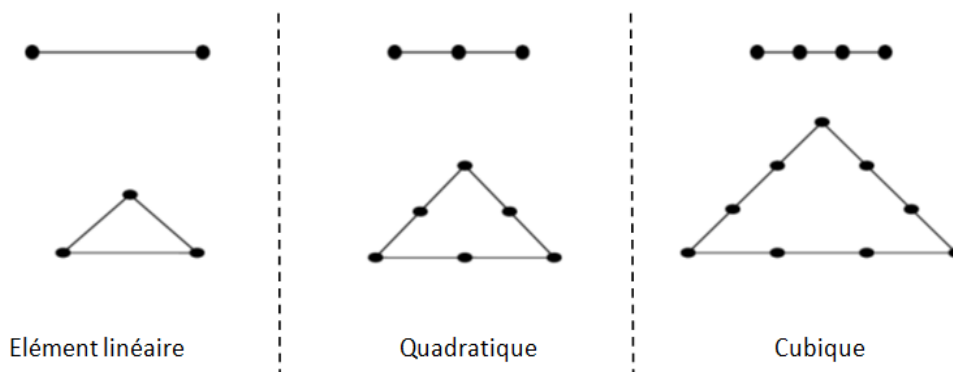


Figure 3.1:Principaux types d'éléments utilisés en 2D.

3.4 Présentation du programme de modélisation FEMM:

Pour modéliser le moteur asynchrone Nous utilisons logiciel 2D basé sur la méthode des éléments finis désigné par FEMM (Finite Element Method Magnetics).C'est le dernier Le logiciel FEMM, Finité Elément Méthode Magnétiques (FEMM) est un logiciel open source d'analyse par éléments finis pour résoudre les problèmes électromagnétiques. Le programme aborde les problèmes 2D planaires et 3D axisymétriques harmoniques linéaires et non linéaires magnétiques.

3.5 Fonctionnement du logiciel:

Après avoir ouvert le programme: cliquez sur nouvelle page Et choisissez (Magnetics Problem) et OK.

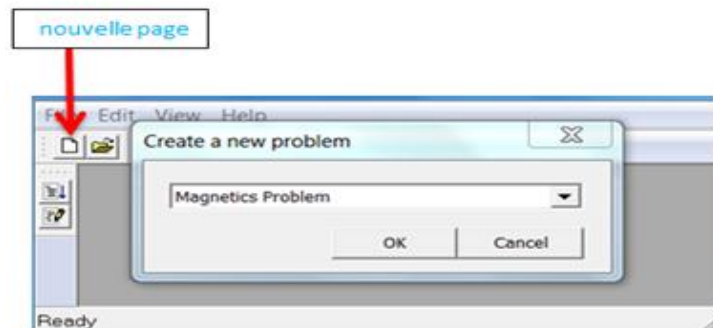


Figure3.2:Connectez-vous au programme FEMM.

3.5.1 Affiche la barre d'action :

Après avoir accédé à la page du programme, nous trouvons.[20]

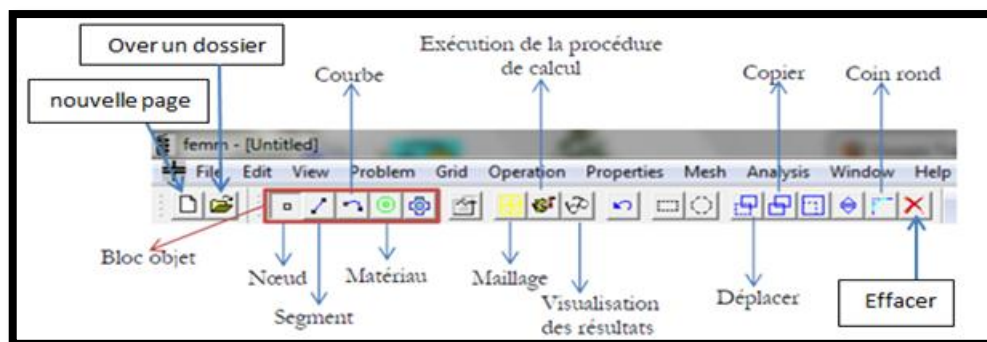


Figure 3.3:La barre des tâches apparaît.

3.5.2 Paramètre du problème :

Cliquez sur "Problème" dans la barre des tâches pour vous montrer une liste. Réglage de la fréquence et unité de mesure etc....

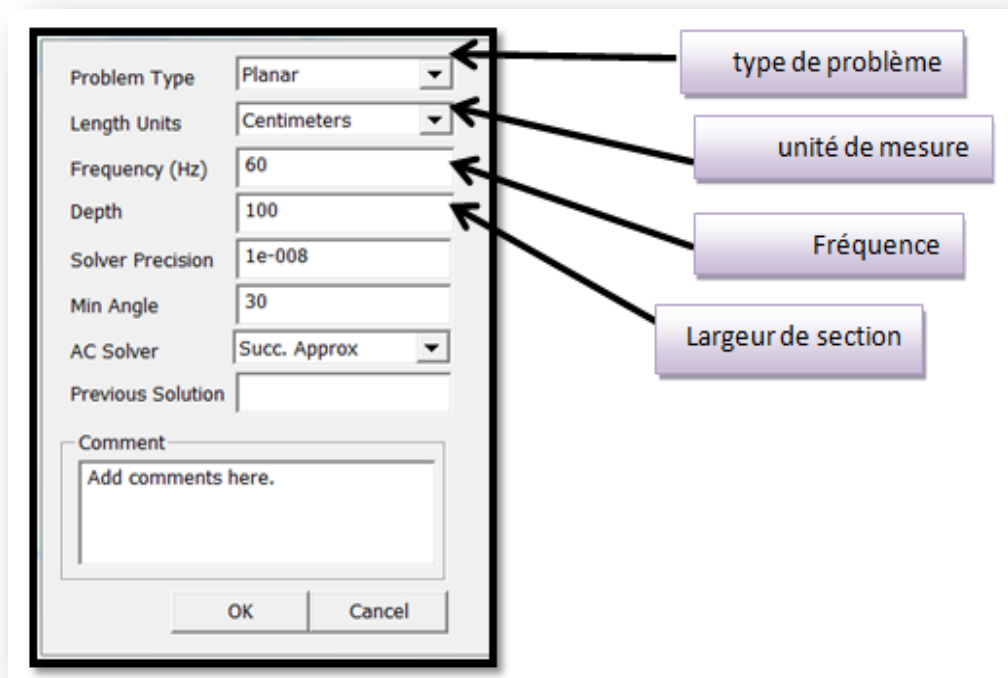


Figure 3.4: Tableau des informations sur les problèmes.

3.5.3 Le choix des matériaux et des milieux:

Cliquez sur un problème et choisissez la première option pour ajouter un métal ou de l'air au fond. Avec un choix de propriétés de chaque composant.

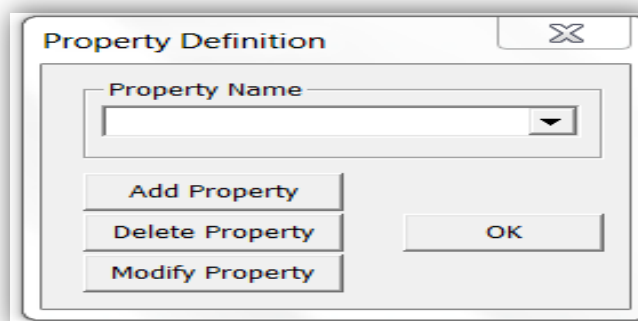


Figure 3.5: Définition des matériaux utilisés dans le problème.

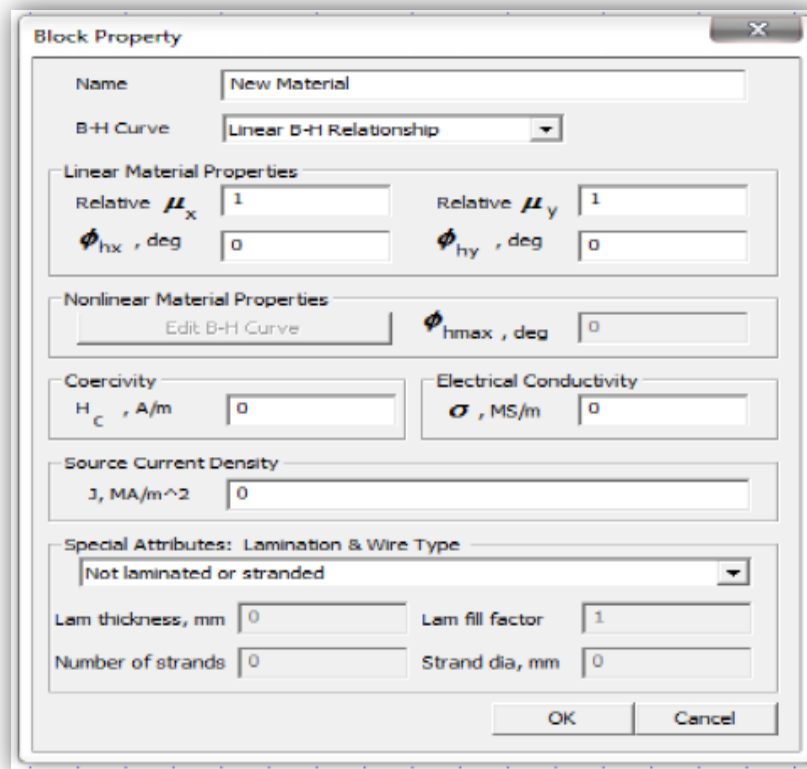


Figure 3.6:Boîte de dialogue propriété de bloc.

3.5.4 Informations importantes:

Entrez les informations dans le FEMM (commande de l'ordinateur)

- Pour annuler une opération : [CTRL+ Z]
- Pour afficher les propriétés d'un objet : [SPACE]
- Le bouton de droite permet de sélectionner l'objet le plus proche, en fonction du type d'objet choisi dans [bloc objet].
- Le bouton de gauche dépose un objet correspondant au choix sélectionne dans [bloc objet].Lorsque un objet est sélectionné ,il devient rouge.
- Pour entrer les coordonnées ,Dun point (nœud) : [Tab].

3.6 Etapes de modélisation d'un problème :

- Données du problème à étudier (Description).
- Extraction du model géométrique et maillage.
- Choix d'une méthode de résolution.(MDF, MEF, MVF...)
- Résultats et exploitation.

➤ Où I_b est la courant d'alimentation de la phase B

$$I_b = I * \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.2)$$

➤ Où I_c est la courant d'alimentation de la phase C

$$I_c = I * \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.3)$$

• **Équation de la densité de courant électrique :**

pour de la calculer la densité de courant électrique de la 3 phase (A-B-C).

Nous avons la loi suivante:

$$J = \alpha \frac{N}{S} \cdot I \quad (3.4)$$

Avec:

J: la densité de courant électrique.[A/Cm²]

N: la nombre de spires du bobinage.

S: la surface dans l'encoche.[Cm²]

I: la courant électrique nominale.[A]

Tableau1 : Caractéristiques du moteur étudié.

Densité de courant électrique (A/Cm²)	310
La conductivité électrique de la pièce par l'aluminium (Ω/m)	37.2*10⁶
La conductivité électrique du rotor (Ω/m)	1.6*10⁶
La fréquence (Hz)	50
Nombre de phases	3
Densité du courant dans la phase A. (MA/m ²)	3.1
Densité du courant dans la phase B. (MA/m ²)	-1.55+I*2.68
Densité du courant dans la phase C. (MA/m ²)	-1.55-I*2.68

- **Model géométrique et maillage:**

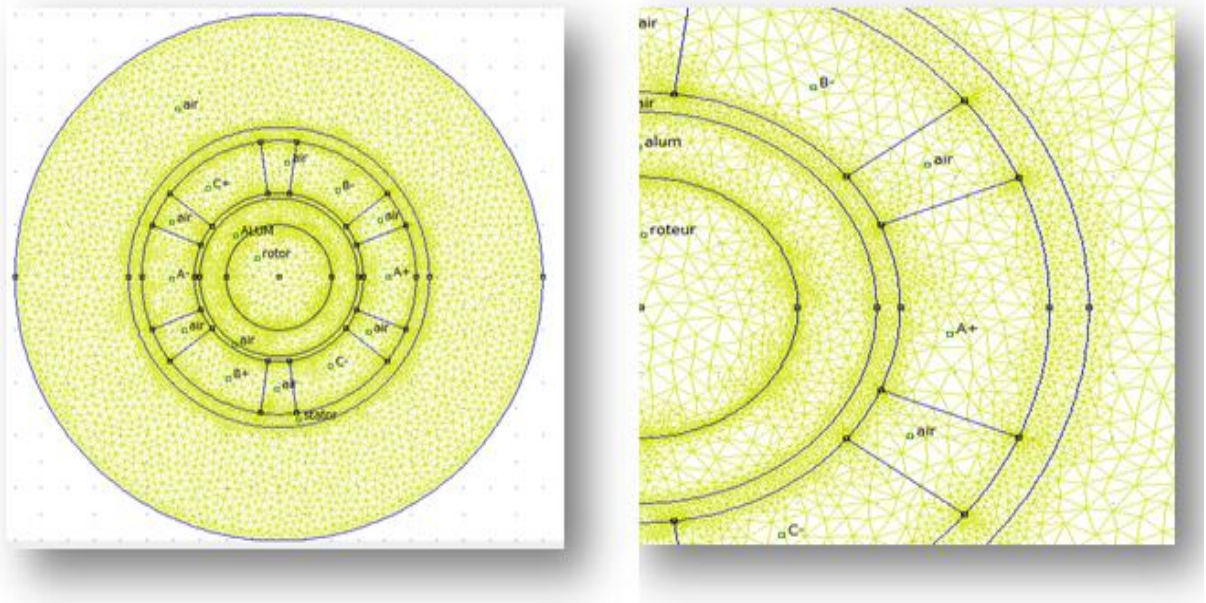


Figure3.8: Maillage et Zoom de Maillage.

- **Résolution :**

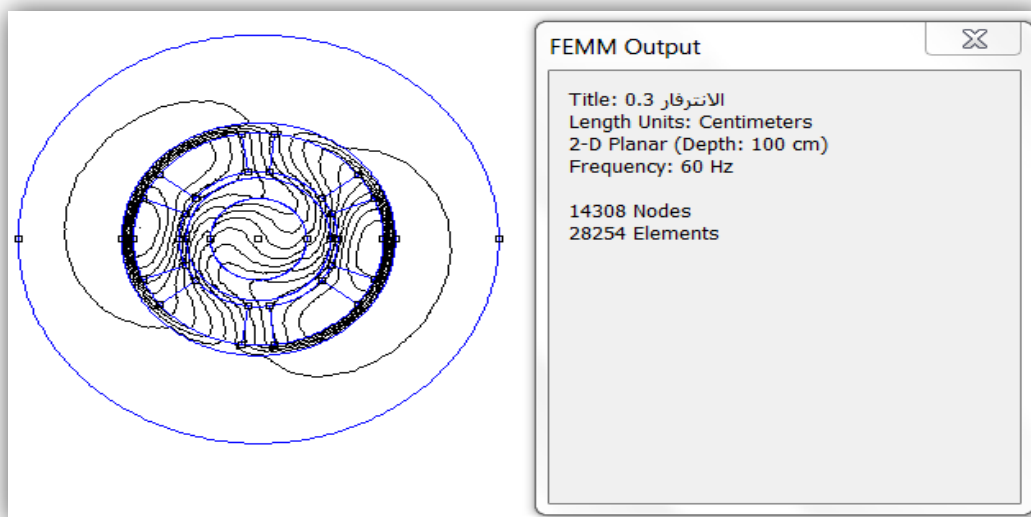


Figure3.9: Le résultat avec ,Nodes 14308 et Elements 28254.

- **Résultats et calcul du couple moteur:**

Pour cela, la partie mobile (rotor) doit être sélectionnée, en cliquant sur l'icône d'intégration dans la barre d'état choisissez torque (couple).

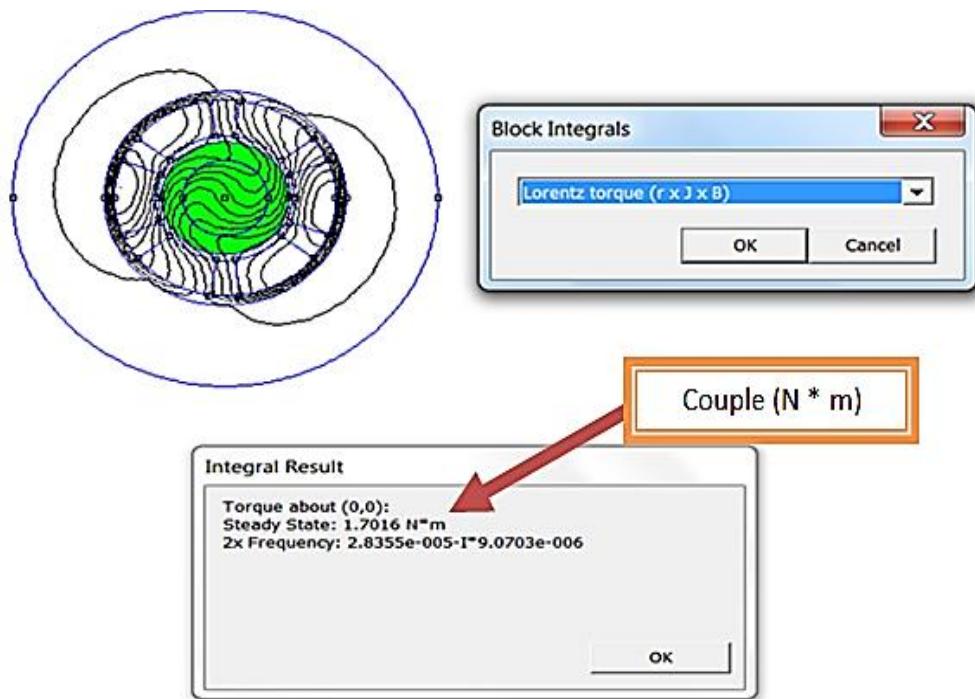


Figure 3.10: Étapes Calcul du couple, Égal (1.7).

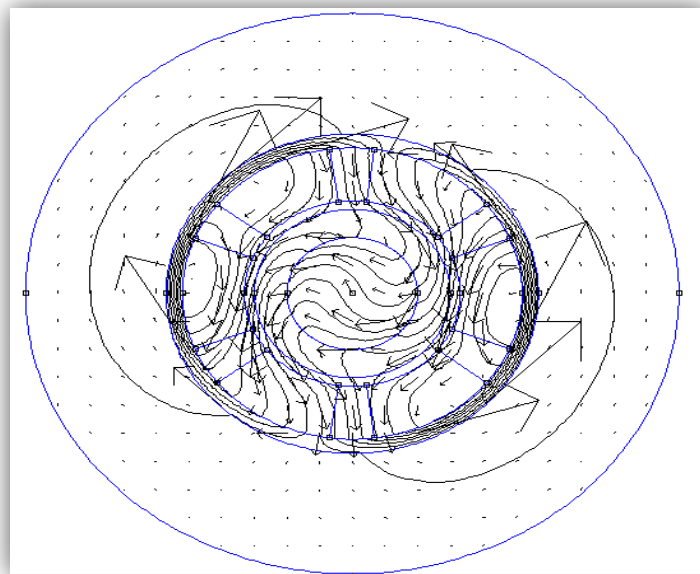


Figure 3.11: Les vecteurs de l'induction magnétique.

La figure 3-11: représente la distribution des vecteurs d'induction magnétique dans le moteur. On constate qu'elles sont concentrées dans deux régions, l'une en entrée et l'autre en sortie, représentant ainsi les pôles (N et S) créés par l'inducteur.

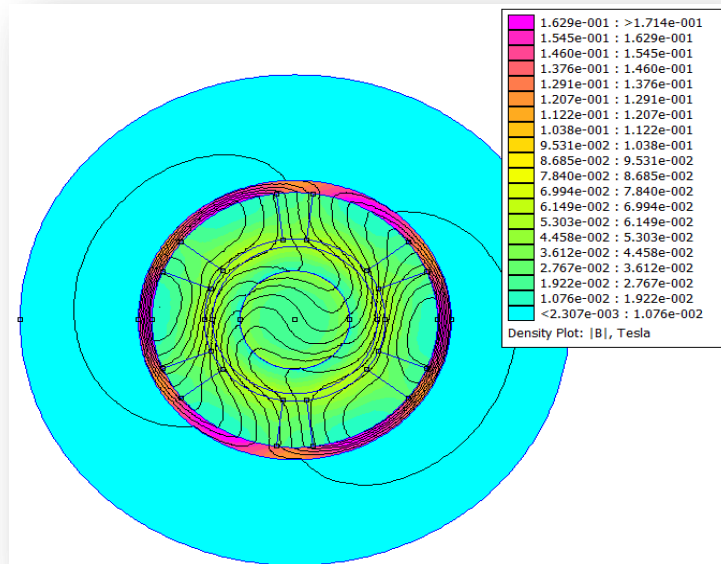


Figure 3.12: Dégradé de couleur de l'induction magnétique.

La figure 3-12: montre la teinte de la distribution d'induction magnétique dans le moteur. Cette figure montre clairement le moteur N et les pôles de la concentration de flux dans deux régions ou pôles.

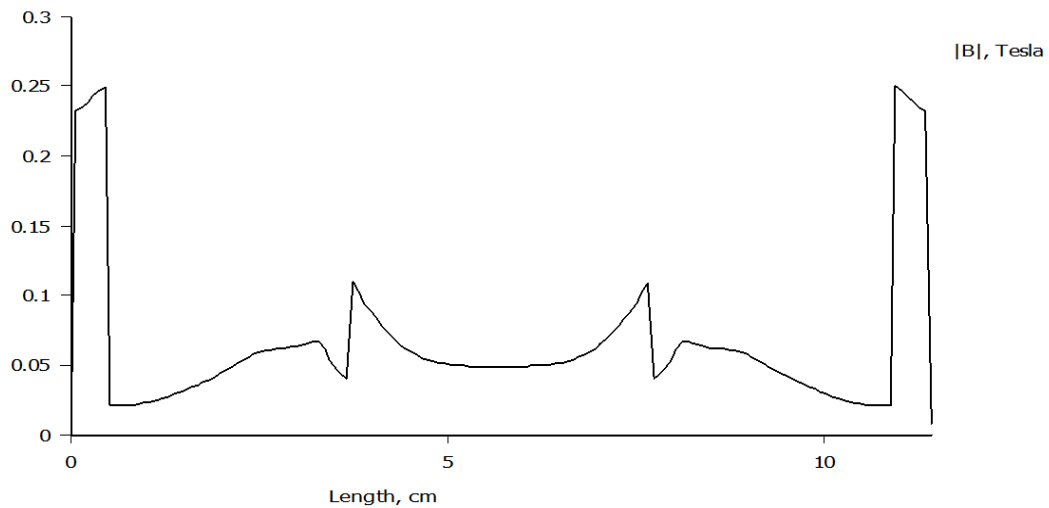


Figure 3.13 : Induction magnétique dans (le moteur), en Tesla.

La figure 3-13: représente le module de l'induction magnétique dans tous les points suivant l'axe 'x' dans la plaque Aluminium (induit). On remarque que l'induction magnétique est concentrée au niveau des deux pôles du moteur avec une valeur maximale de l'ordre de 0.25 Tesla.

3.8 Effet des différents paramètres sur le couple:

3.8.1 Effet de l'entrefer sur le couple:

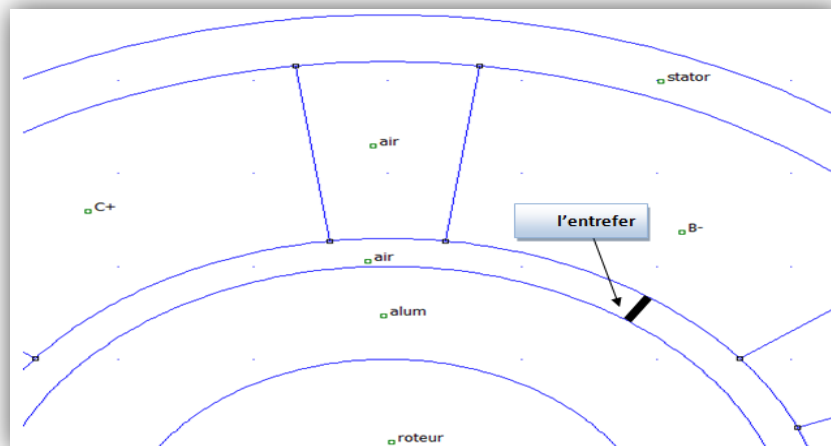


Figure3.14:Entrefer : Distance entre l'inducteur et l'induit.

La figure3-14: représente l'effet de l'entrefer (espace entre rotor et stator) un champ magnétique tournant à la vitesse , Le rotor tourne à la vitesse n plus petite que la vitesse de synchronisme n_s . On dit que le rotor « glisse » par rapport au champ tournant.

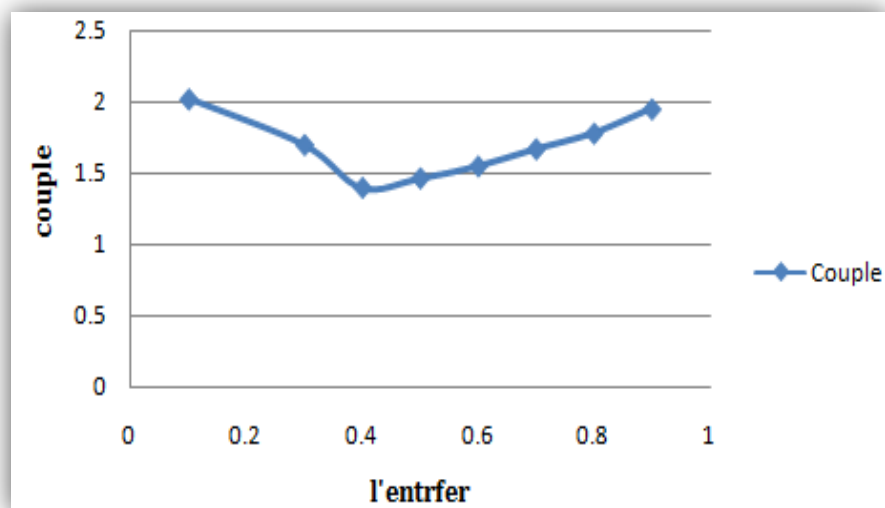


Figure 3.15:Effet de l'entrefer sur la couple.

Tableau2 : Effet de l'entrefer sur le couple.

Entrefer(mm)	0.1	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Couple(Nm)	2.02	1.7	1.4	1.466	1.55	1.67	1.78	1.95

Le Tableau 2 et figure 3-15: représentent les résultats de la modélisation et l'effet de l'entrefer sur la valeur de couple appliquée au rotor. On observe que le couple diminue au fur et à mesure que l'entrefer augmente jusqu'à 0,4(mm), puis augmente. La meilleure valeur de couple est 2,02(Nm) à l'entrefer 0,1(mm).

3.8.2 Effet de la largeur de la bobine sur le couple:

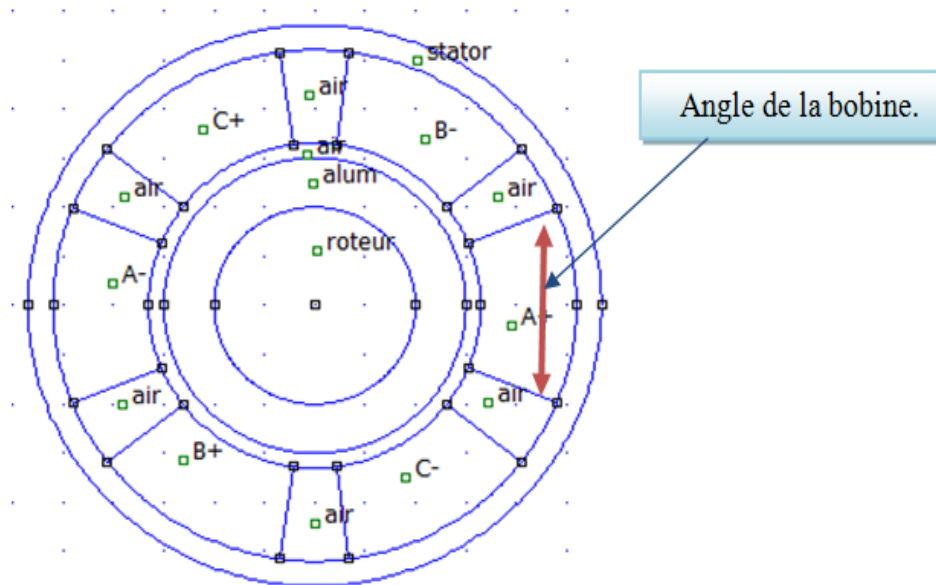


Figure 3.16: Angle de la bobine.

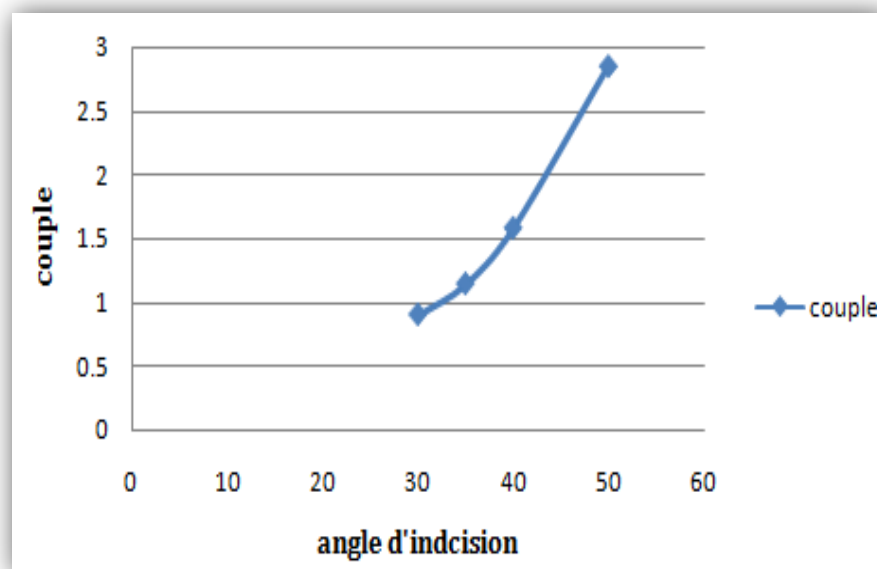


Figure 3.17: Effet de l'angle bobine.

Tableau3 : Effet angle bobine sur le couple.

Angle de la bobine L'unité (degré)	30	35	40	50
Couple(Nm)	0.9	1.143	1.58	2.85

Le tableau 3 et la figure 3.17 représentent les résultats de la modélisation. Il s'agit de l'effet de l'angle de la bobine sur la valeur de couple appliquée au rotor. Notez que le couple augmente avec l'augmentation de l'angle. La meilleure valeur de couple est de 2,85(Nm) à l'angle 50(degré)

3.8.3 Effet de l'intensité du courant sur le couple:

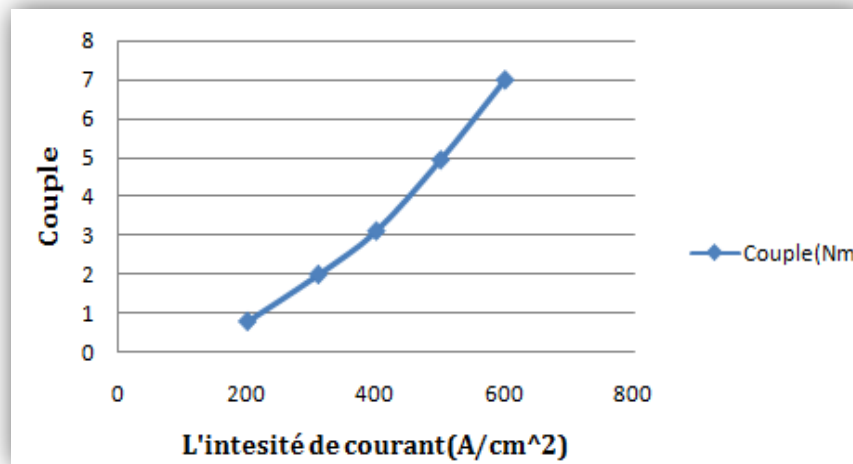


Figure 3.18: Effet de l'intensité sur le couple.

Tableau4 : Effet du courant sur le couple.

L'intensité de courant(A/cm^2)	200	310	400	500
Couple(Nm)	0.77	1.98	3.1	6.99

Le tableau 4 ainsi que la figure 3-18: représentent les résultats de la modélisation. C'est l'effet du courant source sur la valeur du couple appliqué au rotor, on note que le couple augmente avec l'augmentation du courant source. La meilleure valeur de couple est 6,99(Nm) au courant 600(A/cm^2)

3.8.4 Effet de l'épaisseur d'aluminium sur le couple:

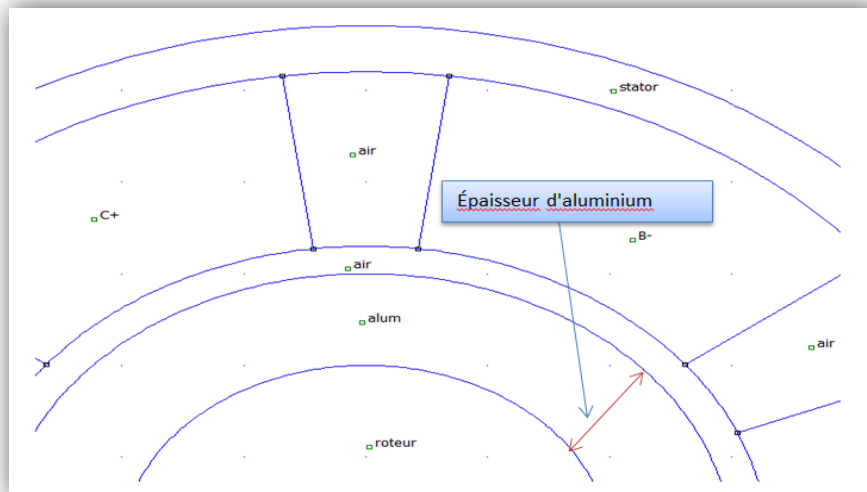


Figure 3.19:Épaisseur d'aluminium.

La figure 3-19 : Il représente l'épaisseur de l'aluminium dans le moteur. Il appartient à la partie mobile du moteur asynchrone.

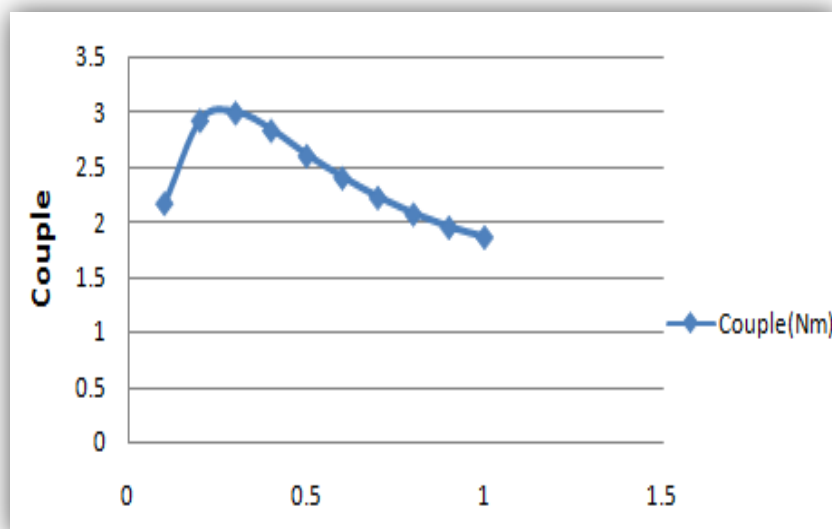


Figure 3.20: Effet de l'épaisseur d'aluminium sur le couple.

Tableau5 : Table Effet Épaisseur d'aluminium sur la couple.

Épaisseur d'aluminium (mm)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Couple (Nm)	2.168	2.92	2.99	0.83	2.6	2.4	2.22	2.07	1.95	1.86

Le tableau 4 et la figure 3-19 : représentent les résultats de la modélisation et l'effet de l'épaisseur de l'aluminium sur la valeur de couple appliqué à la pièce mobile. On note que le couple augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de l'aluminium à la valeur 0,4, après il diminue progressivement. D'après les résultats, nous disons que 0,4 est le meilleure valeur..

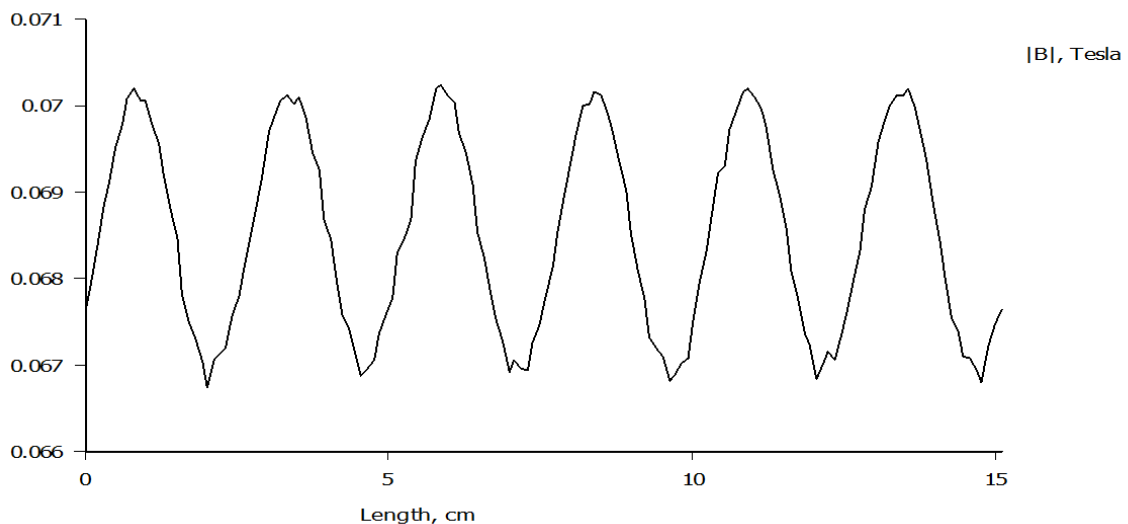


Figure 3.21: Induction magnétique en (Motor) une sélection circulaire, l'unité est Tesla.

La figure 3.21: On remarque sur cette courbe la montée de l'induction électromagnétique dans les pôles positifs et sa diminution dans les pôles négatifs.

3.9. Conclusion:

Cette partie est principalement consacrée à l'évaluation du couple électromagnétique généré dans le moteur. Et l'effet de certains paramètres sur le couple tels que la densité du courant de la source, l'entrefer, la largeur de la plaque d'aluminium,..etc. L'importance d'étudier le moteur asynchrone, car c'est le moteur le plus utilisé dans les domaines industriels.

Chapitre 4 : Application de la méthode réseaux de neurones

4.1 Introduction:

Dans la quatrième partie, nous appliquerons la méthode des réseaux neurones en utilisons les résultats extraits de l'application FEMM (chapitre précédent). Le concept des réseaux de neurones artificiels fut inventé en 1943 par deux chercheurs de l'Université de Chicago le neurophysicien Warren Mc Cullough, et le mathématicien Walter Pitts. Dans un article publié dans le journal Brain Theory, les deux chercheurs présentent leur théorie selon laquelle l'activation de neurones est l'unité de base de l'activité cérébrale. [41].

4.2 Les domaines d'application des réseaux neuronaux:

Les domaines d'application des réseaux neuronaux sont souvent caractérisés par une relation entrée-sortie de la donnée d'information :

- La reconnaissance d'image;
- Les classifications de textes ou d'images;
- Identification d'objets;
- Prédiction de données et Filtrage d'un set de données;

4.3 Un réseau de neurones: composition

Un réseau de neurones est en général composé d'une succession de couches dont chacune prend ses entrées sur les sorties de la précédente. Chaque couche (i) est composée de N_i neurones, prenant leurs entrées sur les N_{i-1} neurones de la couche précédente. À chaque synapse est associé un poids synaptique, de sorte que les N_{i-1} sont multipliés par ce poids, puis additionnés par les neurones de niveau (i), ce qui est équivalent à multiplier le vecteur d'entrée par une matrice de transformation. Mettre l'une derrière l'autre les différentes couches d'un réseau de neurones reviendrait à mettre en cascade plusieurs matrices de transformation et pourrait se ramener à une seule matrice, produit des autres, s'il n'y avait à chaque couche, la fonction de sortie qui introduit une non linéarité à chaque étape.[42]

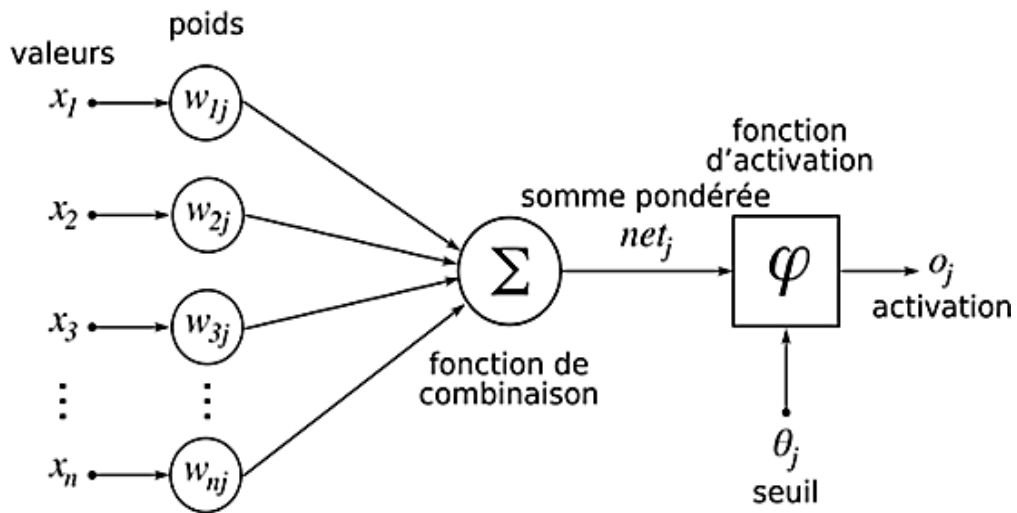


Figure 4.1: réseau de neurones est en général.[41]

4.4 Types de réseaux de neurones:

Un réseau de neurones peut prendre des formes différentes selon l'objet de la donnée qu'il traite et selon sa complexité et la méthode de traitement de la donnée. Les architectures de réseaux neuronaux peuvent être divisées en 4 grandes familles :

- Réseaux de neurones Feed forwarded
- Réseaux de neurones récurrent (RNN)
- Réseaux de neurones à résonance
- Réseaux de neurones auto-organisés

4.4.1 Réseaux de neurones Feed forwarded :

Il se compose de deux types, le réseau neuronal direct est une seule couche cachée et le réseau neuronal direct est multicouche. Il se compose d'une couche d'entrée et d'une couche de sortie. Le réseau est activé en recevant des informations d'entrée. Les données sont traitées dans ce réseau entre la couche d'entrée et la couche de sortie, qui sont toutes interconnectées. Par conséquent, l'ensemble du réseau n'a qu'une matrice de poids.

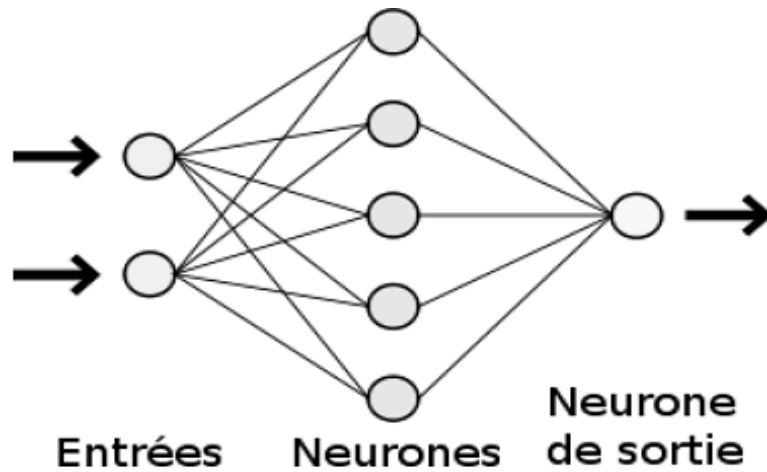


Figure 4.2: Le réseau neuronal direct est masqué à une seule couche.[44]

Et le perceptron multicouche se structure de la même façon. L'information entre par une couche d'entrée et sort par une couche de sortie. À la différence du perceptron simple, le perceptron multicouche dispose entre la couche en entrée et la couche en sortie une ou plusieurs couches dites « cachées ». Le nombre de couches correspond aux nombres de matrices de poids dont disposent le réseau. Un perceptron multicouche est donc mieux adapté pour traiter les types de fonctions non-linéaires. [43]

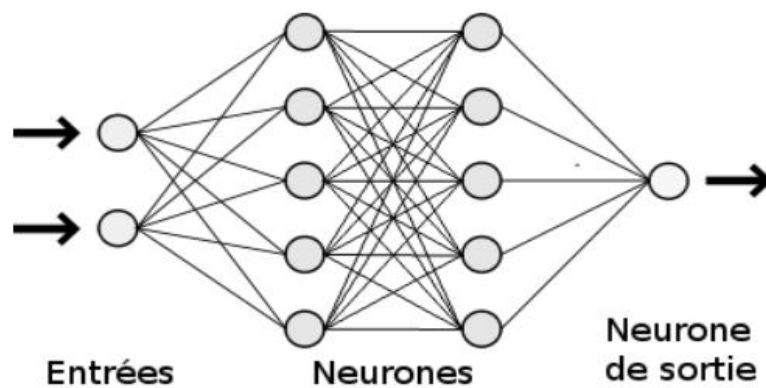


Figure4.3:Le réseau neuronal direct est multicouche.[43]

4.4.2 Réseaux de neurones récurrent (RNN) :

Les Réseaux de Neurones récurrents traitent l'information en cycle. Ces cycles permettent au réseau de traiter l'information plusieurs fois en la renvoyant à chaque fois au sein du réseau.

La force des Réseaux de neurones récurrents réside dans leur capacité de prendre en compte des informations contextuelles suite à la récurrence du traitement de la même

information. Cette dynamique auto-entretient le réseau. Les Réseaux de neurones récurrents se composent d'une ou plusieurs couches.

4.4.3 Réseaux de neurones auto-organisés :

Les Réseaux de neurones auto-organisés sont surtout adaptés pour le traitement de d'informations spatiales. Par des méthodes d'apprentissage non-supervisé, les réseaux neuronaux auto-organisés sont capables d'étudier la répartition de données dans des grands espaces comme par exemple pour des problématiques de clustérisassions ou de classifications.

4.5 Etapes de travail dans cette partie:

En utilisant les étapes du réseau neuronal, nous travaillerons pour prédire le couple, comme suit (Comme variable d'entrées, nous avons choisis trois variables la fréquence, l'entrefer et l'épaisseur de Aluminium, et à la sortie représente le couple) :

- 1) Calcul du couple dans le programme FEMM en changeant à chaque fois les valeurs d'entrées.
- 2) Écriture d'un programme Matlab.
- 3) Résultats.
- 4) Exploitation.

4.6 Illustration montrant le travail du réseau neuronal (l'entrée et la sortie):

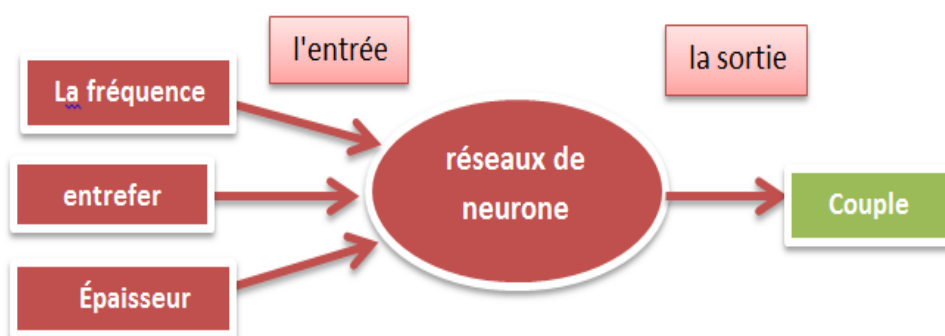


Figure 4.4: Une illustration des étapes de travail Par le réseau neuronal.

4.7 Calcul du couple dans le programme FEMM:

Le calcul du couple s'effectue par le logiciel FEMM, en changeant à chaque fois les valeurs de la fréquence, l'entrefer et l'épaisseur d'aluminium pour une densité de courant constante 500 [A/Cm²] et un angle de la bobine constant fixé à 45 degré. Les résultats de calcul sont résumés dans les tableaux suivants:

Tableau 6 : Les valeurs du couple, pour les fréquences 2Hz et 10Hz.

2hz			10hz		
Entrefer (mm)	Epaisseur (mm)	Couple (Nm)	Entrefer (mm)	Epaisseur (mm)	Couple (Nm)
0.5	1	1.7	0.5	1	8.07
0.5	3	3.4	0.5	3	14.9
0.5	5	4.3	0.5	5	17.08
0.5	8	4.8	0.5	8	16.7
0.5	11	4.7	0.5	11	14.9
1	1	1.6	1	1	7.6
1	3	3.2	1	3	13.9
1	5	4.04	1	5	16.2
1	8	4.5	1	8	15.9
1	11	4.2	1	11	13.6
2	1	1.4	2	1	6.7
2	3	2.8	2	3	12.4
2	5	3.5	2	5	14.5
2	8	3.9	2	8	14.3
2	11	3.7	2	11	12.8
3	1	1.2	3	1	5.8
3	3	2.4	3	3	10.98
3	5	3.1	3	5	12.9
3	8	3.4	3	8	12.8
3	11	3.2	3	11	11.5
4	1	1.1	4	1	5.1

4	3	2.1	4	3	9.7
4	5	2.7	4	5	11.4
4	8	2.9	4	8	11.37
4	11	2.8	4	11	10.19

Le tableau 6 montre les valeurs du couple calculé par FEMM pour des fréquences 2Hz et 10Hz, en modifiant l'entrefer et l'épaisseur de l'aluminium du rotor.

Tableau 7 : Valeurs du couple pour les fréquences 20Hz, 50Hz et 60Hz.

20Hz			50Hz			60Hz		
Entrefer (mm)	Epaisseur (mm)	Couple (Nm)	Entrefer (mm)	Epaisseur (mm)	Couple (Nm)	Entrefer (mm)	Epaisseur (mm)	Couple (Nm)
0.5	1	14.4	0.5	1	22.67	0.5	1	23.33
0.5	3	21.65	0.5	3	19.28	0.5	3	17.41
0.5	5	20.7	0.5	5	13.95	0.5	5	12.14
0.5	8	17.03	0.5	8	9.76	0.5	8	8.39
0.5	11	14.08	0.5	11	7.78	0.5	11	6.75
1	1	13.6	1	1	21.78	1	1	22.5
1	3	20.7	1	3	18.91	1	3	17.15
1	5	20	1	5	13.33	1	5	12.02
1	8	16.6	1	8	9.67	1	8	8.33
1	11	12.99	1	11	7.33	1	11	6.4
2	1	12.1	2	1	20.04	2	1	20.88
2	3	18.9	2	3	18.14	2	3	16.57
2	5	18.6	2	5	13.38	2	5	11.74
2	8	15.6	2	8	9.45	2	8	8.18
2	11	12.98	2	11	7.57	2	11	6.6
3	1	10.7	3	1	18.34	3	1	19.27
3	3	17.15	3	3	17.31	3	3	15.93
3	5	17.13	3	5	12.95	3	5	11.42
3	8	14.6	3	8	9.21	3	8	7.99

3	11	12.2	3	11	7.39	3	11	6.47
4	1	9.5	4	1	16.7	4	1	17.69
4	3	15.5	4	3	16.44	4	3	15.25
4	5	15.7	4	5	12.47	4	5	11.06
4	8	13.5	4	8	8.94	4	8	7.8
4	11	11.4	4	11	7.19	4	11	6.61

Le tableau7: montre les valeurs du couple en modifiant l'entrefer et l'épaisseur de l'aluminium pour les fréquences 20Hz, 50Hz et 60Hz.

4.8 Écriture d'un programme Matlab:

Le programme suivant utilise la commande Matlab « newff » afin de générer le réseau de neurones correspondant au problème étudié dans la partie précédente.

```

1 -   clc
2 -   clear all
3
4 -   entrefer=[ ];
5 -   epaisseur=[ ];
6 -   frequence=[ ];
7 -   couple=[ ];
8 -   entrees=[entrefer epaisseur frequence]';
9 -   sortie=couple';
10 -  net = newff(entrees,sortie,5);
11 -  net.trainParam.epochs =100040;
12 -  net = train(net,entrees,sortie);
13 -  list_de_done = sortie_calculée = sim(net,entrees);
14 -  plot(sortie,'ro-'); hold on
15 -  plot(sortie_calculée,'b*-');

```

Figure 4.5: Réseau de neurones sur Matlab.

4.9 Vérification des résultats

Tableau 8 : Résultats du couple pour 100 valeurs (Ceci n'est qu'une partie des résultats et la partie complète de la liste des annexes)

No. du test	Couple Calculé par FEMM(Nm)	Couple estimé par réseau de neurones(Nm)
1	1.7	1.544566456
2	3.4	3.366330759
3	4.3	4.556410491
4	4.5	4.896112864
5	4.2	4.288806012
6	1.4	1.397478637
7	2.8	2.993875794
8	3.5	4.011727944
9	3.9	4.261809259
10	3.7	3.475913027
11	1.2	1.055205546
12	2.4	2.472418637
13	3.1	3.390629485
14	3.4	3.544551575
165	3.2	2.758750933
16	1.1	0.497304635
17	2.1	1.717111654
18	2.7	2.562954434
19	2.9	2.786023243
20	2.8	2.201018771
21	8.07	8.824789634
22	14.9	14.29143805
23	17.08	17.0165298
24	16.7	16.49019172
25	14.9	14.1810772

- Le tableau 8 montre une comparaison entre les résultats du couple obtenus par le logiciel FEMM et les résultats obtenus par le réseau neuronal pour 100 valeurs de test.

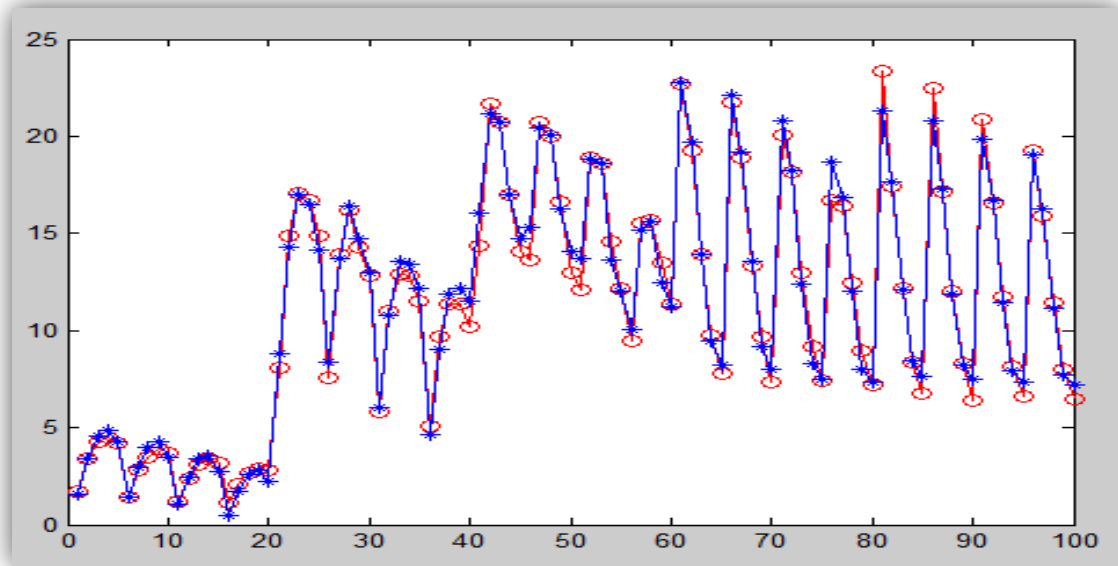


Figure 4.6: Comparaison entre le couple obtenu par FEMM et réseau neuronal.

La figure 4.6: Cette dernière courbe montre la différence entre le couple calculé par FEMM et le couple estimé par le RN. La couleur rouge représente le couple calculé par FEMM et la couleur bleue représente le couple estimé. Notez que les courbes sont très proches avec une faible erreur.

4.10 Apprentissage du RN et exploitation:

Nous appelons les variables (a = entrefer, b = épaisseur, c = fréquence). Le programme suivant utilise la fonction Matlab « train » pour l'apprentissage du RN.

La dernière étape est l'apprentissage et le but de l'apprentissage est d'améliorer le programme.

Les étapes sont précises et toutes les informations sont fournies dans les annexes

```

1 -   clc
2 -   clear all
3
4 -   entrefer=[ ];
5 -   epaisseur=[ ];
6 -   frequence=[ ];
7 -   couple=[ ];
8 -   entrees=[entrefer epaisseur frequence]';
9 -   sortie=couple';
10 -  net = newff(entrees,sortie,5);
11 -  net.trainParam.epochs =100040;
12 -  net = train(net,entrees,sortie);
13 -  list_de_done = sortie_calculée = sim(net,entrees);
14 -  plot(sortie,'ro-'); hold on
15 -  plot(sortie_calculée,'b*-');
16 -  err=sum(abs(sortie_calculée-sortie))/100;
17
18 -  a=[ ];
19 -  b=[ ];
20 -  c=[ ];
21 -  list_de_tast_sortie = sim(net,[a b c ]');
22

```

Figure4.7: Programme pour l'apprentissage du RN.

Tableau 9 : Le couple (résultats d'apprentissage) pour 25 valeurs.

No.	Couple par FEMM(Nm)	Couple par réseau de neurones(Nm)
1	4.8	5.17387031
2	4.7	4.707952723
3	1.6	1.54065369
4	3.2	3.292309727
5	4.04	4.422998993
6	15.9	15.94097601
7	13.6	13.78836845
8	6.7	7.258168698
9	12.4	12.30954616
10	14.5	15.07442043
11	15.6	14.90787487
12	12.98	12.99113313
13	10.7	11.93930867
14	17.15	17.04242964

15	17.13	17.0663255
16	13.38	12.88149633
17	9.45	8.650273923
18	7.57	7.712118862
19	18.34	19.67916842
20	17.31	17.45885843
21	17.69	18.46119621
22	15.25	15.95230885
23	11.06	11.01764255
24	7.8	7.596857035
25	6.61	7.116424642

- Le tableau 9 montre les résultats du couple obtenu par FEMM et RN pour les 25 valeurs restantes (dite phase de test du RN).

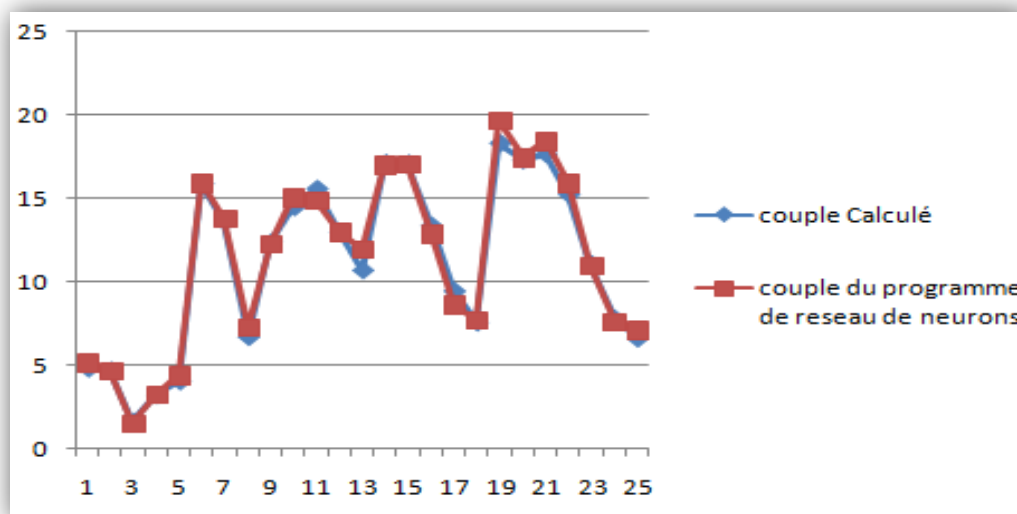


Figure4.8: Résultat du couple obtenu par RN.

Cette dernière courbe (figure 4-8) montre la différence entre le couple calculé par FEMM et le couple estimé par RN. La couleur bleue représente le couple calculé dans le FEMM et la couleur rouge représente le couple estimé par le réseau neuronal. Notez que les courbes sont très proches, avec un faible écart.

- **Test du programme:**

Test1: entrefer =0.5; épaisseur =8; fréquence =2;

Sortie_ calcule = Sim(net,[entrefer épaisseur fréquence]')

Sortie_ calcule = 5.1739

Test2: entrefer =0.50 ; épaisseur =08 ; fréquence =50;

Sortie_ calcule = 9.4434

Test3: entrefer =3 ; épaisseur =2 ; fréquence =60;

Sortie_ calcule = 18.0599

Test4: entrefer =4 ; épaisseur =5 ; fréquence =50;

Sortie_ calcule = 12.0120

En comparant ces valeurs avec les valeurs du tableau ci-dessus, nous remarquons que ces valeurs sont très proches. de cela, nous concluons que ce programme peut être utilisé pour prédire le couple électromagnétique.

4.11 Conclusion:

Dans cette dernière partie, le principe des réseaux de neurones a été appliqué au moteur asynchrone. Nous avons utilisé les résultats obtenus de FEMM. Matlab a été utilisé pour générer le réseau neuronal. Nous avons comparé les résultats du couple dans le FEMM avec les résultats dans le réseau neuronal. Pour chaque changement dans les propriétés du réseau de neurones, nous trouvons une nouvelle erreur. Il y a une grande convergence vers un taux d'erreur très faible. Le RN généré peut être utilisé pour prédire le couple pour un problème d'optimisation par exemple.

Conclusion générale :

Dans ce travail, l'objectif principal était lié à la modélisation par le logiciel FEMM pour moteur asynchrone. Le couple électromagnétique a été évalué dans le logiciel en utilisant la méthode des éléments finis comme méthode d'estimation numérique. Le FEMM permet des résultats proches de la mesure. Et nous avons étudié l'effet de nombreuses variables sur le couple électromagnétique telles que (courant source, entrefer et fréquence)

Dans le premier chapitre nous avons traité d'un ensemble de machines en prélude, dans le deuxième chapitre le moteur asynchrone Et son principe de fonctionnement , dans le troisième chapitre la modélisation du moteur en FEMM et le calcul du couple, et dans le quatrième chapitre l'application des réseaux de neurones et l'apprentissage, l'objectif principal est de prédire le couple du moteur asynchrone à travers une petite valeur Le taux d'erreur a été estimé à 0,465

En fin de compte, ce programme est fiable et le couple peut être prédit.

Bibliographie:

- [1]: Chouaib Labiod, « Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans une machine à reluctance variable » thèse de Magister, université de Biskra, 05/2014.
- [2]: Dr. ELKHEIR Merabet Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique Université de Batna Département de LMD ST Faculté de Technologie 2013/2014 Polycopie Machines électriques.
- [3]: Choisir un actionneur et, sa commande Denis Guérin [TSI Eiffel Dijon] Conversion électromécanique, Machine à courant continu.
- [4]: Etude et simulation d'un variateur de vites d'une Machine à courant continu Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent Institut de Technologie Département de Génie Electrique Année universitaire 2017/2018.
- [5]: Lycée Gustave Eiffel de Dijon Classe préparatoire P.T.S.I. Année 2016 - 2017 Électrotechnique , Modélisation du Moteur à Courant Continu.
- [6]: Bernard Multon Laboratoire SATIE-CNRS, Antenne de Bretagne de l'Ecole Normale Supérieure Cachan (Ecole Normale Supérieure de Rennes, à partir du 1er janvier 2014) Delphine Chareyron Année 23/09/2013.
- [7]: Fabrice Sincère ; version 3.0.5 <http://pagesperso-orange.fr/fabrice.sincere/>
- [8]: Techniques le blog d'un passionné de technologie, du Moteur à Courant Continu la Génie Electrique Année 02/11/2010.
- [9]: Mohamed Lamine HAMIDA Farid KADI Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE Domaine, Sciences et Technologies Filière Génie Electrique Spécialité Machines électriques Thème Identification et contrôle de la machine à courant continu par la Dspace 1103 Mémoire soutenu publiquement le 20/09/ 2015.
- [10]: J. Chatelain " Machines électriques " , Edition Georgi , Lausanne ,1983.
- [11]: BENNOUR Khadîdja SEBIH Samia Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l'obtention du diplôme de Master (LMD) Spécialité, MACHINES ET RESEAUX ELECTRIQUES Intitulé Détection du défaut des amortisseurs d'une machine synchrone par l'approche des courants actif et réactif instantanés 2016-2017.

- [12]: R. Abdessemed " Modélisation et simulation des machines électriques", Presses, Batna, Algérie.
- [13]: <https://www.maxicours.com/se/cours/moteurs-asynchrones-triphases>.
- [14]: Chouabbi Moussa et DjebablaMebarekMEMOIRE DE MASTER DOMAINE Sciences et Technologies FILIERE, Électrotechnique OPTION, Réseaux électriques Thème Etude de la stabilité transitoire du réseau Est algérien avec L'extension du poste Berrahal 400 KV,Année 2017 – 2018.
- [15]: La machine synchrone triphasée ,Terminale STI Génie Electrotechnique Fabrice Sincère , version 1.0.5, Physique appliquée La machine synchrone triphasée.
- [16]: MouadOubidar. SedikBendaoud. « Machine synchrone/asynchrone ». Projet de fin d'étude en ingénierie dans le cadre du programme en génie électromécanique 30 avril 2010 Université du Québec.
- [17]: Pierre mayé « aide-mémoire électrotechnique », livre.
- [18]: Bapyobayala « la machine asynchrone », Edition revue 2010.
- [19]: D. Hadiouche, ''contribution { l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure'', Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-1., soutenue 20 décembre 2001.
- [20]: Auteur : alain.charbonnel@ac-caen.fr Mis à jour le 27 11 2010.
- [21]: Ce document présente les connaissances de base sur le moteur asynchrone nécessaire à l'étude de la barrière SYMPACT.
- [22]: Présenté en vue de l'obtention du diplôme de magistère Electrotechnique Option Commande et modélisation des machines électriques .Par [Sihem MOUELLEF] Contribution A L'étude D'une Machine AReluctance Variable Conception, Modélisation& Simulation D'une MRVDS 6-4Soutenu le 03/06/ 2008.
- [23]: Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention du diplôme Master En Génie Electrique Thème Optimisation énergétique d'un moteur à réluctance variable Soutenu le28/06/2011.
- [24]:E. Salamé Etude d'un moteur à réluctance variable à disques imbriqués alimenté à tension constante, G. Goyet, authors C. Rioux Published 1984 Engineering.

- [25]: Principe et éléments de dimensionnement des machines à réluctance variable à double saillance autopilotées Année 1993 March.
- [26]: BOUDJATAT WALID KELAIAIA M S HIMOURA ABEDELKADER Université d'Annaba Kelaiaia M S ETUDE ET SIMULATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE ALIMENTEE PAR UN ONDULEUR DE TENSION A COMMANDE MLI année juin 2017
- [27]: Kundur, Power system stability and control. New York: McGraw Hill, 1994.
- [28]: Les systèmes industriels HB pour La vue éclatée ci-dessous nomme les principaux composants d'une machine asynchrone Melec année Novembre 2017
- [29]: GAUTHIER François CALCUL DES PARAMÈTRES DE LA MACHINE ASYNCHRONE FRANÇOIS GAUTHIER année 2017
- [30]: moteur asynchrone 22 JUIN COMMENTS ELECTROMECHANIQUE avec <http://4electromecanique.blogspot.com/2016/06/moteur-asynchrone.html>.
- [31]: Amal Guezmil Mrag Sur la Synthèse et l'Implémentation des Observateurs d'État pour le Diagnostic et la Commande de la Machine Asynchrone 2017/2018.
- [32]: Djedjai-Hammi modélisation du moteur asynchrone à double cage bu.univ-ouargla.dz › 2016.
- [33]: <https://energieplus-lesite.be/techniques/ascenseurs7/moteur-asynchrone>
- [34]: Narjess SGHAIER - Fèdia DOURI, ISET de Kélibia Mesures Electriques page (40).
- [35]: HAMADOU Adil et NESSISSEN Abdelkader Modélisation numérique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil Promotion, 2015
- [36]: S. CHEKROUN OPTIMISATION MAGNETIQUE ET ELECTRIQUE DES MACHINES ASYNCHRONES A HAUT RENDEMENT Année Universitaire : 2006 / 2007
- [37]: démarrage, moteur, asynchrone, triphasés, branchement moteur, démarrage étoile triangle, résistances statoriques, circuit commande, circuit puissance, auto-transformateurs le 21/10/ 2017
- [38]: Mémoire de fin d'études En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique Option : Réseaux électriques Thème Dirigé par Mme F. BITAM-MEGHERBI UMMTO Mr D. BELKACEMI Electro-Industries

Etudié par : AIT MAMMAR Zahra ACHABOU Zahir CHILI Mohammed
Promotion 2011 Compensation de la puissance réactive dans un transformateur
de distribution MT/BT

[39]: LIVRE Gouri Dhatt, Gilbert Touzot Une présentation de la méthode des éléments finis

[40]: MEZIANI Nedjma Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magister en
génie civil Option: Mécanique de sol et Structures THÈME CONTRIBUTION DE
L'APPROCHE EN DÉFORMATION DANS LA MODÉLISATION DES STRUCTURES
A CONTOUR CIRCULAIRE Soutenu le 2006.

[41]: <https://www.lebigdata.fr/reseau-de-neurones-artificiels-definition> 5 avril 2019

[42]: Neural Networks : biologique computers or électronique bairns - Les entretiens de
Lyon – (sous la direction de École normale supérieure de Lyon), Springer-Verlag, 1990.

[43]: <https://www.juripredis.com/fr/blog/id-19-demystifier-le-machine-learning-partie-2-les-reseaux-de-neurones-artificiels>.

[44]: Jean-Paul Haton, Modèles connexionnistes pour l'intelligence artificielle, 1989.

Annexes:

Annexes1:

La Version du programme femm utilisée est FEMM 4.2

La Version du programme matlab utilisée est MATLAB R2009a

Annexes1:

- Résultats du couple pour 100 valeurs.

No. du test	Couple Calculé par FEMM (Nm)	Couple estimé par réseau de neurones (Nm)
1	1.7	1.544566456
2	3.4	3.366330759
3	4.3	4.556410491
4	4.5	4.896112864
5	4.2	4.288806012
6	1.4	1.397478637
7	2.8	2.993875794
8	3.5	4.011727944
9	3.9	4.261809259
10	3.7	3.475913027
11	1.2	1.055205546
12	2.4	2.472418637
13	3.1	3.390629485
14	3.4	3.544551575
165	3.2	2.758750933
16	1.1	0.497304635
17	2.1	1.717111654
18	2.7	2.562954434

19	2.9	2.786023243
20	2.8	2.201018771
21	8.07	8.824789634
22	14.9	14.29143805
23	17.08	17.0165298
24	16.7	16.49019172
25	14.9	14.1810772
26	7.6	8.337264669
27	13.9	13.67688315
28	16.2	16.42093401
29	14.3	14.73318155
30	12.8	12.98193741
31	5.8	6.027223002
32	10.98	10.76310359
33	12.9	13.5517663
34	12.8	13.44498833
35	11.5	12.20196591
36	5.1	4.640232714
37	9.7	9.0635875
38	11.4	11.91131042
39	11.37	12.15628224
40	10.19	11.49491206
41	14.4	16.06680639
42	21.65	21.19208927
43	20.7	20.71433711
44	17.03	16.9793853
45	14.08	14.70410452
46	13.6	15.32550908
47	20.7	20.44306095
48	20	20.02974215
49	16.6	16.28017256

50	12.99	14.0983987
51	12.1	13.71358744
52	18.9	18.81285796
53	18.6	18.57605498
54	14.6	13.62448384
55	12.2	12.03969247
56	9.5	10.03674676
57	15.5	15.19470314
58	15.7	15.57372909
59	13.5	12.47569993
60	11.4	11.24477826
61	22.67	22.74710787
62	19.28	19.68011542
63	13.95	13.95403608
64	9.76	9.443408482
65	7.78	8.191660749
66	21.78	22.08494054
67	18.91	19.16141607
68	13.33	13.55378161
69	9.67	9.14306682
70	7.33	8.007777376
71	20.04	20.82058484
72	18.14	18.2308397
73	12.95	12.37381285
74	9.21	8.280978756
75	7.39	7.494007169
76	16.7	18.69004402
77	16.44	16.84518613
78	12.47	12.01203852
79	8.94	8.010464437
80	7.19	7.334413448

81	23.33	21.30559123
82	17.41	17.67297491
83	12.14	12.10381097
84	8.39	8.435891622
85	6.75	7.604896949
86	22.5	20.78146642
87	17.15	17.3137424
88	12.02	11.84800842
89	8.33	8.250890325
90	6.4	7.497223341
91	20.88	19.84861685
92	16.57	16.71667316
93	11.74	11.44913247
94	8.18	7.957037906
95	6.6	7.327214136
96	19.27	19.07769112
97	15.93	16.27011068
98	11.42	11.18068368
99	7.99	7.745618888
100	6.47	7.204486687

Annexes3:

- **Les étapes du programme en détails. Par (MATLAB)**

clc

clear all

```
entrefer=[ 0.5000  0.5000  0.5000  1.0000  1.0000  2.0000  2.0000  2.0000
2.0000  2.0000  3.0000  3.0000  3.0000  3.0000  3.0000  4.0000  4.0000
4.0000  4.0000  4.0000  0.5000  0.5000  0.5000  0.5000  0.5000  1.0000
1.0000  1.0000  2.0000  2.0000  3.0000  3.0000  3.0000  3.0000  3.0000
4.0000  4.0000  4.0000  4.0000  4.0000  0.5000  0.5000  0.5000  0.5000
0.5000  1.0000  1.0000  1.0000  1.0000  1.0000  2.0000  2.0000  2.0000
3.0000  3.0000  4.0000  4.0000  4.0000  4.0000  4.0000  0.5000  0.5000
```

```

0.5000 0.5000 0.5000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 2.0000
2.0000 3.0000 3.0000 3.0000 4.0000 4.0000 4.0000 4.0000 4.0000
0.5000 0.5000 0.5000 0.5000 0.5000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000
1.0000 2.0000 2.0000 2.0000 2.0000 2.0000 3.0000 3.0000 3.0000
3.0000 3.0000 ]';

```

```

epaisseur=[ 1 3 5 8 11 1 3 5 8 11 1 3 5 8 11 1 3
5 8 11 1 3 5 8 11 1 3 5 8 11 1 3 5 8 11 1 3
5 8 11 1 3 5 8 11 1 3 5 8 11 1 3 5 8 11 1 3
5 8 11 1 3 5 8 11 1 3 5 8 11 1 3 5 8 11 1 3
5 8 11 1 3 5 8 11 1 3 5 8 11 1 3 5 8 11 1 3
5 8 11]';

```

```

frequence=[ 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
2 2 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10
10 10 10 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20
20 20 20 20 20 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50
50 50 50 50 50 50 50 60 60 60 60 60 60 60 60 60 60
60 60 60 60 60 60 60 60 60]';

```

```

entrees=[ entrefer epaisseur frequence ]';

```

```

sortie=couple';

```

```

net = newff(entrees,sortie,5);

```

```

net.trainParam.epochs =10000;

```

```

net = train(net,entrees,sortie);

```

```

sortie_calculée = sim(net,entrees);

```

```

plot(sortie,'ro-'); hold on

```

```

plot(sortie_calculée,'b*-');

```

```

err=sum(abs(sortie_calculée-sortie))/100

```

avec: 10000 C'est le nombre d'itérations

- **Les étapes d'apprentissage en détail**

Nous appelons les variables (a = entrefer, b = épaisseur, c = fréquence). Le programme suivant utilise la fonction Matlab « train » pour l'apprentissage du RN.


```
a= [0.5000  0.5000  1.0000  1.0000  1.0000  1.0000  1.0000  2.0000  
2.0000  2.0000  2.0000  2.0000  3.0000  3.0000  3.0000  2.0000  
2.0000  2.0000  3.0000  3.0000  4.0000  4.0000  4.0000  4.0000  
4.0000]
```

```
b= [8  11  1  3  5  8  11  1  3  5  8  11  1  3  5  5  8  11  
1  3  1  3  5  8  11]
```

```
c= [ 2  2  2  2  2  10  10  10  10  10  20  20  20  20 20  50  50  
50  50  50  60  60  60  60  60]
```

```
sortie_calcule = sim(net,[ a b c ]')
```