

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



UNIVERSITE Med BOUDIAF DE M'SILA  
FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

**OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE**

**THEME**

---

**OPTIMISATION PARAMETRIQUE DES MACHINES ASYNCHRONES  
PAR  
L'APPLICATION DES ALGORITHMES GENETIQUES**

---

Proposé et dirigé par :

Monsieur : S. CHEKROUN

Présenté par :

REMADNIA Faysal

ABDOU Khaled

Année Universitaire : 2007 / 2008

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

**OPTION: COMMANDE ELECTRIQUE**

**Proposé et dirigé par** : Monsieur : S. CHEKROUN

**Présenté par** : k. ABDOU

F.REMADNIA

**Thème :**

**OPTIMISATION PARAMETRIQUE DES MACHINES ASYNCHRONES  
PAR**

**L'APPLICATION DES ALGORITHMES GENETIQUES**

**Résumé :**

De nos jours, l'amélioration du rendement des moteurs électriques, et son impact sur les économies d'énergie, deviennent un grand défi aux chercheurs et aux fabricants du monde entier. Les moteurs électriques utilisent plus que le demi de l'électricité a consommé, avec une gamme typique de 40-60%, les limites sont inférieures ou supérieures selon le développement des pays. Les moteurs à induction représentent approximativement 90% de la consommation totale des moteurs électriques. Ces données statistiques sur les moteurs électriques garent partout le spectacle mondial.

Dans ce thème, une recherche bibliographique en premier lieu sera faite sur les travaux déjà réalisés sur l'amélioration du rendement des moteurs à induction. En suite en va voir la possibilité d'économie de l'énergie en Algérie par la présentation d'une approche, qu'on l'applique sur les moteurs du type (E.E. I. Azazga).

**Mots Clés :**

Machines Asynchrones, Optimisation, Algorithmes Génétiques.

# Remerciements

*Avant tout, nous remercions le bon dieu tout puissant qui nous donne de la foi, du courage et de patience, qu'il nous a données durant toutes ces années d'étude.*

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Mr : S . CHEKROUN "pour avoir d'abord proposée ce thème, pour suivi continuel durant toute cette période, qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.*

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants et le chef de département d'Electrotechnique qui a contribué à notre formation par ailleurs, ainsi à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.*

*En fin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel.*

# DEDICACE

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes chers parents mon père Belkasem et ma mère (Nassira et Aicha),  
mon grand mère Alribeh .*

*mes soeurs Karima, Djahida et malaak, A tous les membres de ma grande  
famille,*

*A tout mes profs qu'il m'ont appris durant toutes mes années d'étude*

*A mon encadreur S. Chakroun et sa femme.*

*A tout les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour être un  
jour un ingénieur d'état en électrotechnique.*

*Et bien sur à mon collègue Abdou Khelad qui m'a accompagné pendant le  
long de cette période pour réaliser ce modeste travail.*

*A tous mes amis que je ne vais pas nommer car ils sont nombreux & je ne  
sais pas qui choisir.*

*A tous mes collègues sans exception & à toutes les promos 2008 surtout  
Commande électrique.*

*A tous mes voisins & à tout les habitants de mādīd .*

*Je vous remercie tous*

*Fayçal*

# DEDICACE

*Je dédie ce mémoire à*

*Mes chers parents: la mère salima le père Djamel avec toute ma gratitude pour toutes ces années de sacrifices et d'encouragement, Mon frère :Azzedine, Mes très chers sœurs(Nadia,Houda),Et particulièrement l' enfant de ma soeur:Abdelrahmen .*

*Mes grands parents que dieu le garde, A ma grand-mère Reguia(رحمة  
عليها الله)*

*A tous les membres de ma famille grand et petit.*

*A mon encadreur S. Chakroun et sa femme*

*A tout les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour être un jour un ingénieur d'état en électrotechnique.*

*Et bien sur à mon collègue Remadnia Fayçal qui m'a accompagné pendant le long de cette période pour réaliser ce modeste travail*

*A tous mes amis que je ne vais pas nommer car ils sont nombreux & je ne sais pas qui choisir.*

*A tous les étudiants de la faculté en génie électrotechnique surtout les étudiants de la 5ème année promotion 2008. commande électrique.*

*A tous mes voisins & à tout les habitants de EL-achir.*

**Khaled**

# **Sommaire**

# Sommaire

Sommaire.....	
Liste des figures .....	
Notation et symboles .....	
Introduction générale.....	1-2

## *Chapitre un*

### *Généralités sur les machines asynchrones*

1.1 Introduction .....	3
1.2 Historique sur les machines asynchrones .....	4
1.3 Constitution des machines asynchrones.....	4
1.3.1 Stator .....	4
1.3.1.1 Enroulement et encoches du stator .....	5
1.3.2 Rotor .....	5
1.3.2.1 Rotor bobiné .....	6
1.3.2.2 Rotor a cage d'écureuil .....	6
❖ Caractéristique du rotor a cage .....	7
1.3.2.3 Rotor a double cage.....	7
1.3.2.4 Rotor a encoche profonde .....	7
1.3.3 Les organes mécaniques .....	8
1.4.1 Choix du membre d'encoches .....	8
1.4.2 l'Entrefer .....	9
1.4.3 l'Isolation .....	9
1.5 Schéma équivalent .....	9
1.6 Principe de fonctionnement .....	10
1.6.1 Caractéristiques de fonctionnement .....	10
❖ 1.6.1.1 Fonctionnement à vide.....	10
❖ Fonctionnement en charge.....	11
I.6.2-Caractéristique mécanique du moteur asynchrone $C = f(n)$ .....	11
1.7 Vitesse et glissement.....	11
1.7.1 Vitesse angulaire .....	12
1.7.2 Glissement .....	12
1.8 MAS en fonctionnement réversible - génératrice asynchrone .....	12

1.9 Les pertes dans les machines asynchrones .....	13
1.9.1 Les pertes dans les circuits électriques .....	13
1.9.1.1 Pertes nominales en basse fréquence.....	13
1.9.1.2- Pertes supplémentaires à fréquence élevée .....	14
1.9.1.2.1- Cas des courants sinusoïdaux .....	14
1.9.1.2.2 Cas des courants non sinusoïdaux .....	14
1.9.2 Les Pertes dans le circuit magnétique .....	14
1.9.2.1 Les pertes magnétiques de fer $P_{fer}$ .....	14
1.9.2.1.1 Les pertes par courant de Foucault $P_f$ .....	15
1.9.2.1.2 Les pertes par Hystérésis ou pertes Hystériques $P_h$ .....	15
1.9.3 Les Pertes mécanique .....	16
1.9.3.1 Pertes par frottement .....	16
1.9.3.1.1 Pertes par frottement dans les paliers .....	16
1.9.3.1.2 Pertes par frottement dans les roulements .....	16
1.9.3.1.3 Pertes aérodynamiques .....	16
1.9.3.1.4 Pertes aux contacts balais - collecteur et balais-bague .....	17
1.9.3.2 Pertes par ventilation .....	17
1.10 Bilan énergétique .....	18
1.10.a) Bilan des puissances au stator .....	18
Puissance transmise au rotor.....	18
1.10.b) Bilan des puissances au rotor .....	18
▪ Pertes par effet Joule dans le rotor.....	18
▪ Pertes constantes: pertes mécaniques + pertes fer: $P_c$ .....	19
1.10-c) Bilan total des puissances .....	19
1.11- Rendement du moteur asynchrone .....	19
1.12- Avantages et Inconvénients d'Utilisations des moteurs asynchrones .....	19
○ Avantages .....	19
○ Inconvénients .....	19
Utilisation .....	19
1.13 Conclusion.....	20

## **Chapitre II**

### **La Conception des machines asynchrones**

2.1 Introduction .....	21
2.2 Méthode de conception .....	22

2.2.1 Organigramme de calcul .....	22
2.2.1.1 Cahier de charge .....	22
2.2.1.2 Calcul préliminaire .....	22
2.2.1.3 Calcul des dimensions géométriques principales du rotor –stator .....	24
2.2.1.3.1 Dimensionnement des encoches .....	24
2.2.1.3.2 l'Entrefer .....	24
2.2.1.3.3 Enroulement de la machine .....	25
✚ Facteur de distribution $K_{d1}$ .....	25
✚ Facteur de raccourcissement $K_{p1}$ .....	25
2.2.1.4 Calcul de la FMM .....	25
• F.M.M dans l'entrefer .....	26
• F.M.M dans les dents statorique .....	26
• F.M.M dans les dents rotorique.....	26
• F.M.M dans la culasse statorique.....	26
• F.M.M dans la culasse rotorique .....	26
• 2.2.1.4.1 Coefficient de saturation .....	26
2.2.1.4.2 Calcul du nombre de spires $NI$ par phase du primaire .....	27
2.2.1. 4.3 Coefficient de forme .....	27
2.2.1.4.4 Facteur de carter (correction de l'entrefer) .....	27
2.2.1.5-Courant magnétisant .....	27
2.2.1.5.1 Courant de barre et anneau de court-circuitage .....	28
2.2.1.5 La dispersion .....	28
2.2.1.5.1 Dispersion d'encoche .....	30
2.2.1.5.2 Réactance de fuite différentielle.....	31
2.2.1.5.3 Réactance de fuite des têtes de bobines.....	31
2.2.1.6 Calcul des pertes .....	32
2.2.1.6.1 Pertes par effet de joule ou pertes en cuivre .....	32
2.2.1.6.1.2 Dans le stator .....	32
2.2.1.6.1.3 Dans le rotor .....	33
2.2.1. 6.1.3 Pertes fer.....	33
2.2.1.6.1.3.1 Pertes d'Hystérésis.....	33
2.2.1.6.1.3.2 Pertes par courant de Foucault .....	34
2.2.1.7 Détermination du rendement de la machine .....	34
2.2.1.8 Conclusion .....	34

**Chapitre III**  
**Les Algorithmes génétiques**

3.1 Introduction .....	35
3.2 Définitions .....	35
3.3 Caractéristique de l'AG.....	35
3.4 Principe de fonctionnement .....	36
3.4.1 Codage .....	36
3.4.2 Procédé d'implantation des AGs .....	37
3.4.3 Paramètres de l'AG .....	37
3.4.4 Ossature de l'algorithme .....	38
3.5 Evaluation .....	38
3.6 Sélection .....	38
3.7 Reproduction avec les opérateurs de croisement et de mutation .....	39
3.7.1 Croisement .....	39
3.7.1.1 Croisement un point du discret .....	39
3.7.1.2 Croisement a deux points .....	40
3.7.1.3 Croisement continu (ou uniforme) .....	40
3.7.1.4 Croisement arithmétique .....	41
3.7.2 Mutation .....	42
3.7.2.1 Mutation uniforme .....	42
3.7.2.2 Mutation non uniforme .....	43
3.8 Organigramme de la procédure AG .....	44
3.9 Application d'optimisation par AGs .....	45
3.9.1 Procédure de maximisation par algorithmes génétiques .....	45
3.9.2 Exemple d'application .....	46
a) Première étape .....	47
 la genèse de la population et les paramètres .....	47
b) Deuxième étape .....	47
 l'évaluation .....	47
c) Troisième étape .....	48
 La selection .....	48
d) Quatrième étape .....	48
 Le croisement .....	48
e) Cinquième phase .....	49

✚ La mutation .....	49
3.10 Conclusion .....	50

**Chapitre IV**  
**Moteur à induction à haut rendement**

4.1 Introduction.....	51
4.2 Moteurs à induction à haut rendement (MI-HRs) .....	52
4.3 Rendement des moteurs à induction.....	53
4.4 Caractéristiques des moteurs à haut rendement.....	53
4.5 Différentes normes de mesures du rendement.....	54
4.6 Méthodes de mesures .....	55
Méthode 1.....	55
Méthode 2.....	55
Méthode 3.....	55
Méthode 4.....	55
Méthode 5.....	56
4.7 l'influence de quelques facteurs sur le rendement des moteur électriques.....	56
4.7.1 Qualité d'alimentation d'énergie.....	56
4.7.2 Charge du moteur.....	56
4.7.3 Plage d'utilisation des moteurs.....	56
4.7.5 Maintenance du moteur.....	56
4.8 Travail réalisé .....	57
4.8.1 Variables de conception et leurs limites .....	59
4.8.2 Résultats d'Optimisation et discussion.....	49
a) En utilisant tôles d'acier 3.6 W/ kG .....	59
b) En utilisant tôles d'acier 2.3 W/ kG .....	60
4.8.3 Analyse dynamique .....	61
a) Banc d'essai .....	61
b) Résultants de simulation .....	63
c) interprétation des résultats .....	64
4.9 Conclusion .....	65
<b>Conclusion générale</b>	
Conclusion générale.....	66-67

## Liste de Figure

<b>Fig 1.1</b> Machine asynchrone.....	3
<b>Fig. 1.2</b> Stator d'une machine asynchrone.....	5
<b>Fig. 1.3</b> Structure d'un rotor en cage d'écureuil.....	7
<b>Fig. 1.4</b> Tôle utilisée pour la réalisation d'une cage à double encoche.....	7
<b>Fig. 1.5</b> Coupe d'un rotor à cage à encoches profondes.....	7
<b>Fig. 1.6</b> Les organes de la machine asynchrone.....	8
<b>Fig. 1.7</b> Schéma équivalent de type transformateur.....	10
<b>Fig. 1.8</b> Caractéristique mécanique d'un moteur asynchrone.....	11
<b>Fig. 1.9</b> Fonctionnement réversible - génératrice asynchrone.....	13
<b>Fig. 1.10</b> Bilan des puissances pour une machine asynchrone.....	18
<b>Fig. 2.1</b> Organigramme de conception d'une machine asynchrone.....	22
<b>Fig. 2.2</b> Illustration de la notion de dispersion.....	29
<b>Fig. 3.1</b> représentation d'un individu; codage réel (1.a); codage binaire (1.b).....	37
<b>Fig. 3.2</b> Croisement un point (exemple d'un individu à six gènes).....	40
<b>Fig. 3.3</b> Croisement deux points.....	40
<b>Fig. 3.4</b> Croisement continu (ou uniforme).....	41
<b>Fig. 3.5</b> Croisement arithmétique.....	41
<b>Fig. 3.6</b> les différentes étapes de l'algorithmes génétiques.....	44
<b>Fig. 3.7</b> Allure de la fonction à optimiser.....	46
<b>Fig. 4.1</b> Organigramme de la méthode d'optimisation proposée.....	57
<b>Fig. 4.2</b> Moyennes et meilleures valeurs de la fonction d'évolution obtenue avec par l'application des algorithmes génétique utilisant tôles d'acier 3,6 W / kG.....	60
<b>Fig. 4.3</b> Moyennes et meilleures valeurs de la fonction d'évolution obtenue avec par l'application des algorithmes génétique utilisant tôles d'acier 2.3 W / kG.....	61
<b>Fig. 4.4</b> Schéma bloc global du banc d'essai.....	62
<b>Fig. 4.5</b> Couple électromagnétique (N.m) en fonction du temps.....	63
<b>Fig. 4.6</b> La vitesse rotorique (rad/s) en fonction du temps.....	63
<b>Fig. 4.7</b> Couple électromagnétique (N.m) en fonction du temps.....	64
<b>Fig. 4.8</b> La vitesse rotorique (rad/s) en fonction du temps.....	64

## **Liste des figures**

## Liste de Figure

<b>Fig 1.1</b> Machine asynchrone.....	3
<b>Fig. 1.2</b> Stator d'une machine asynchrone.....	5
<b>Fig. 1.3</b> Structure d'un rotor en cage d'écureuil.....	7
<b>Fig. 1.4</b> Tôle utilisée pour la réalisation d'une cage à double encoche.....	7
<b>Fig. 1.5</b> Coupe d'un rotor à cage à encoches profondes.....	7
<b>Fig. 1.6</b> Les organes de la machine asynchrone.....	8
<b>Fig. 1.7</b> Schéma équivalent de type transformateur.....	10
<b>Fig. 1.8</b> Caractéristique mécanique d'un moteur asynchrone.....	11
<b>Fig. 1.9</b> Fonctionnement réversible - génératrice asynchrone.....	13
<b>Fig. 1.10</b> Bilan des puissances pour une machine asynchrone.....	18
<b>Fig. 2.1</b> Organigramme de conception d'une machine asynchrone.....	22
<b>Fig. 2.2</b> Illustration de la notion de dispersion.....	29
<b>Fig. 3.1</b> représentation d'un individu; codage réel (1.a); codage binaire (1.b).....	37
<b>Fig. 3.2</b> Croisement un point (exemple d'un individu à six gènes).....	40
<b>Fig. 3.3</b> Croisement deux points.....	40
<b>Fig. 3.4</b> Croisement continu (ou uniforme).....	41
<b>Fig. 3.5</b> Croisement arithmétique.....	41
<b>Fig. 3.6</b> les différentes étapes de l'algorithmes génétiques.....	44
<b>Fig. 3.7</b> Allure de la fonction à optimiser.....	46
<b>Fig. 4.1</b> Organigramme de la méthode d'optimisation proposée.....	57
<b>Fig. 4.2</b> Moyennes et meilleures valeurs de la fonction d'évolution obtenue avec par l'application des algorithmes génétique utilisant tôles d'acier 3,6 W / kG.....	60
<b>Fig. 4.3</b> Moyennes et meilleures valeurs de la fonction d'évolution obtenue avec par l'application des algorithmes génétique utilisant tôles d'acier 2.3 W / kG.....	61
<b>Fig. 4.4</b> Schéma bloc global du banc d'essai.....	62
<b>Fig. 4.5</b> Couple électromagnétique (N.m) en fonction du temps.....	63
<b>Fig. 4.6</b> La vitesse rotorique (rad/s) en fonction du temps.....	63
<b>Fig. 4.7</b> Couple électromagnétique (N.m) en fonction du temps.....	64
<b>Fig. 4.8</b> La vitesse rotorique (rad/s) en fonction du temps.....	64

# **Notation et Symboles**

# Notation et Symbole

N	Nombre de barres d'une cage	
p	Nombre de paires de pôles	
$n_s$	Vitesse de synchronisme ou vitesse du champ tournant	trs/min
$n_r$	Vitesse rotorique ou vitesse d'exploitation	trs/min
$n_n$	Vitesse nominale	trs/min
g	Glissement	%
P	Puissance active	W
Q	Puissance réactive	W
$C_u$	Couple utile	N.m
$C_n$	Couple nominal	N.m
$C_{\text{éle}}$	Couple électromagnétique	N.m
$P_{\text{mec}}$	Puissance mécanique	W
$P_{\text{éle}}$	Puissance électrique	W
$P_a$	Puissance absorbée	W
$P_u$	Puissance utile	W
$P_{js}$	Pertes joule statorique	W
$P_{jr}$	Pertes joule rotorique	W
$P_{fs}$	Pertes fer statorique	W
$P_{fr}$	Pertes fer rotorique	W
$P_j$	Pertes joule	W
$P_{\text{ve+fr}}$	perles par ventilation et par frottement aux paliers	W
$\eta$	Rendement	
R	Résistance du conducteur	$\Omega$
I	valeur efficace du courant continu ou alternatif	A
$\rho$	Résistivité du matériau	$\Omega$
a	Nombre de voies parallèles	
$L_{\text{moy}}$	Longueur moyenne	m
$N_s$	Nombre de spires en série	
$\alpha$	Coefficient "caractéristique du matériau"	
$E_p$	Epaisseur de peau	m
f, $f_i$	Fréquence	Hz
$\mu$	Perméabilité	
$D_0$	Diamètre du conducteur à section circulaire	m
d	Diamètre réduit	m
$R_0$	Résistance du conducteur en courant continu	$\Omega$
$h_{\text{cd}}$	Epaisseur du conducteur	m
$h_{\text{cdr}}$	Epaisseur réduite du conducteur	
$R_i$	Résistance des termes de série de Fourier	
$f_i$	fréquence des termes de série de Fourier	Hz
$P_{j1}$	Pertes dues au fondamental du courant	W
$K_f$	Coefficient du aux harmoniques	
$K_r$	Coefficient caractéristique de tôle	
$P_{\text{fer}}$	Pertes par effet de Foucault	W
e	Epaisseur de la tôle	
$B_m$	Induction maximale	T
$P_h$	Pertes par hystérésis	W
$K_h$	Coefficient de pertes par hystérésis	

$V_t$	Vitesse tangentielle du rotor	trs/min
$Z_1$	Nombre d'encoches dans le stator	
$Z_2$	Nombre d'encoches dans le rotor	
$f_{d1}$	Fréquence de pulsation dans le stator	Hz
$f_{d2}$	Fréquence de pulsation dans le rotor	Hz
$U$	Tension composée	V
$\cos\varphi$	Facteur de puissance	
$E$	Espace de recherche	
$y$	Fonction du coût	
$h$	fonction de transformation	
$f_j$	fonction d'aptitude de la chaîne $j$	
$f_{moyen}$	Valeur moyenne de la fonction de cout	
$f_{max}$	Valeur maximum de la fonction de cout	
$f_{min}$	Valeur minimale de la fonction de cout	
$R+$	Fitness ou fonction d'évaluation d'individu	
$P_1, P_2$	Parents de la population	
$E_1, E_2$	Enfants de la population	
$L$	Longueur de chromosome	
$K$	Nombre entier	
$P_c$	Probabilité de croisement	
$P_m$	Probabilité de mutation	
$P_s$	Probabilité de sélection	
$N$	Nombre d'individu de la population	
$F$	Nombre d'évaluation totale	
$F$	Fonction simple	
$a, b$	Nombre réel	
$f_{eval}$	Fonction d'évaluation	
$q$	Probabilité cumulative	
$v_j$	Code binaire de chaque chromosome binaire	
$x$	Valeur décimale	
$V_1, V_2,$	Nombre généré aléatoirement	
$V_3, V_4$	Vecteur de la génération initiale en binaire	
$V_1$	Tension statorique simple	V
$P_s$	Puissance apparent	W
$N_1, N_2$	Nombre de spire par phase rotorique et statorique	
$\Phi$	Flux par pôle	Wb
$B_\delta$	L'induction dans l'enterfer	T
$A_1$	Densité linéaire de courant	A/m
$p \tau$	Pas polaire	m
$l_i$	Longueur virtuelle de l'induit	m
$D$	Désigne le Diamètre intérieur du stator (diamètre d'alésage)	m
$C$	Coefficient d'utilisation	
$K_{w1}$	Facteur de bobinage	
$m_1, m_2$	Nombre de phases primaire et secondaire	
$F.M.M$	Force magnétomotrice totale	At
$I_1, I_2$	Valeur efficace du courant primaire et secondaire	A
		Hz

$\lambda$	Rapport géométrique	
$\beta$	rapport du raccourcissement	
$y$	L'ordre d'harmonique	
$H$	Intensité du champ magnétique	A/m
$F$	F.M.M nécessaire pour l'excitation de la machine	At
$H_i$	Induction Intensité du champ pour chaque tronçon	A/m
$F_i$	Tension magnétique pour chaque tronçon	At
$H_\delta$	Intensité du champ dans l'entrefer	A/m
$\delta$	Epaisseur de Entrefer	m
$\delta'$	Entrefer fictif	m
$F_\delta$	Force magnétomotrice dans l'entrefer	At
$K_f$	Facteur de forme de la courbe d'induction	
$K_s$	Coefficient de saturation	
$\Phi_\delta$	Flux dans l'entrefer	Wb
$H\sigma$	Représente une constante du matériau utilisé	
$w\sigma$	Constance du fer	
$\tau_{z1}$ ,	Pas dentaire statorique et rotorique	m
$F_{z1}$ , $F_{z2}$	Force magnétomotrice au dent statorique et rotorique	At
$F_{j1}$ , $F_{j2r}$	Force magnétomotrice dans la culasse statorique et rotorique	At
$I_{2\text{barre}}$	Courant de la barre	A
$h$	Hauteur (au pro fendeur) d'encoche	m
$h_{z1}$ , $h_{z2}$	Profondeur de la dent statorique et rotorique	m
$\delta$	Résistivité	
$H_{j1}$ , $H_{j2}$	Champ magnétique dans la culasse statorique et rotorique	A/m
$H_{z1}$ , $H_{z2}$	Champ magnétique dans la dent statorique, rotorique	A/m
$R_1$ , $R_2$	Résistance statorique et rotorique par phase	$\Omega$
$R_2'$	Résistance totale d'une phase secondaire ramenée au primaire	$\Omega$
$R_{\text{bar}}$	Résistance de barre	$\Omega$
$I_{\text{bar}}$	Courant de la barre	A
$I_2'$	Courant de barre ramenée au primaire	A
$L_{\text{bar}}$	Longueur d'une barre	m
$R_{\text{an}}$	Résistance de anneau	$\Omega$
$d_b$	Diamètre de barre	m
$L_a$	Longueur de la machine	m
$S_t$	Désigne l'épaisseur de la tôle du fer	m
$P_F$	Pertes par courant de Foucault	W
$P_h$	Pertes Hystérésis et de Foucault	W
$P_{hz}$	Pertes d'Hystérésis dans les dents d'encoche statorique	W
$D_e$	Diamètre extérieur de la culasse	m

$m_i$	Masse de la culasse	kG
$m_z$	Masse totale des dents	kG
$K_{wj}$	Masse d'une dent	kG
$i_m$	Nombre des phases	

# **Introduction générale**

# Introduction générale

Les moteurs électriques consomment plus de la moitié de l'énergie produite par les centrales électriques, presque les trois-quarts de la consommation industrielle et presque la moitié de la consommation des secteurs commerciaux dans les pays industrialisés. Les moteurs représentent donc les charges électriques les plus importantes, et ainsi constituent les principales cibles permettant de réaliser des économies d'énergie conséquentes.

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

En raison de l'importante utilisation des moteurs asynchrones, ce travail a pour but de contribuer aux efforts de l'économie d'énergie, plus spécifiquement dans le domaine de moteurs à petites puissances. Il met en évidence le potentiel important d'économie d'énergie aussi bien lors de la phase de conception du moteur que lors de son utilisation. Economiser de l'énergie implique de n'utiliser uniquement que la quantité d'énergie nécessaire au fonctionnement du moteur. Ceci peut être réalisé en améliorant le dimensionnement du moteur lors de sa conception ou par la réduction de son besoin en énergie électrique nominale quand le moteur a été déjà construit. Ces deux facteurs pourraient être pris en compte conjointement en optimisant le moteur à sa conception en fonction de l'utilisation prévue.

La conception, le dimensionnement et l'optimisation du moteur sont indispensables afin de minimiser les pertes et également de permettre son utilisation dans une large gamme de vitesse. Cependant, lorsque le moteur a déjà été construit, la seule possibilité d'économiser de l'énergie passe par la gestion de l'énergie fournie. Diverses stratégies sont possibles. Un accent particulier est porté sur l'utilisation du triac pour réduire la tension d'entrée du moteur. Dans ce mémoire nous aborderons le premier sujet qui s'intéresse beaucoup plus à la conception optimisée.

Le déroulement de ce mémoire suivra les étapes suivantes:

Après une introduction générale, le premier chapitre présente des généralités sur la machine asynchrone ainsi que les différentes caractéristiques de fonctionnement, suivi d'une brève description des pertes existant dans la machine.

Le chapitre deux dresse un état de l'art sur les différentes approches et équations proposées pour la conception assistée d'une machine asynchrone.

Le chapitre trois est une introduction à la synthèse de haut niveau, pour les algorithmes génétiques et leur principe illustré par un exemple d'application.

Le dernier chapitre donne une présentation globale des différentes méthodes, et normes d'évaluation du rendement d'une machine asynchrone mis en œuvre. Il présente également, une nouvelle technique d'évaluation basée sur l'optimisation, qui consiste à utiliser un algorithme génétique en conjonction avec un programme de conception, exposant une interprétation des résultats, enfin une conclusion.

**Chapitre un**  
**Introduction sur les machines**  
**asynchrones**

## 1.1 Introduction :

Le moteur asynchrone est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants ce qui conduit à une structure simple, robuste, facile à construire, son domaine de puissance va de quelques watts à plusieurs mégawatts, relie directement au réseau industriel à tension et fréquence constantes. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales, le moteur asynchrone est dit à induction puisque l'énergie transférée du stator au rotor ou du rotor au stator se fait par induction électromagnétique. Les machines asynchrones couvrent l'essentiel des besoins de la transformation d'énergie électrique en énergie mécanique. Plus de la moitié de l'énergie électrique produite dans les pays industrialisés est transformée en énergie mécanique, par des moteurs. La plupart de ceux-ci appartiennent à l'un des types suivants : à courant continu, asynchrone, synchrone, à courant alternatif à collecteur. On estime généralement que les moteurs asynchrones représentent 70 % de la puissance installée, et qu'ils absorbent 40 à 50 % de l'énergie totale consommée, [1].

Il existe plusieurs types de moteurs asynchrones : monophasé, triphasé à cage, triphasé à rotor bobiné, [2].

Dans ce chapitre, on présente des généralités sur la machine asynchrone pour faire la différence entre cette dernière, et les autres machines à partir de sa constitution, son principe de fonctionnement, et sa caractéristique mécanique. En suite on situera le principe des pertes existantes



**Fig. 1.1** Machine asynchrone

## 1.2 Historique sur les machines asynchrones :

La paternité de la machine asynchrone est controversée. Elle pourrait être attribuée à trois inventeurs : en 1887, Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone, puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets. Pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1888. En 1889, Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de 1891.

Quand la machine asynchrone est alimentée par un réseau à fréquence fixe, il est difficile de faire varier sa vitesse. En outre, au démarrage, le couple est faible et le courant appelé est très élevé. Deux solutions historiques ont résolu ce dernier problème : le rotor à encoches profondes et le rotor à double cage découvert en 1912 par Paul Boucherot. Grâce aux progrès de l'électronique de puissance, l'alimentation par un onduleur à fréquence variable, permet maintenant de démarrer la machine convenablement et de la faire fonctionner avec une vitesse réglable dans une large plage. C'est pourquoi il est utilisé pour la motorisation des derniers TGV ainsi que des nouveaux métros parisiens, [3].

## 1.3 Constitution des machines asynchrones:

Les machines asynchrones sont utilisées comme moteurs, 80% des moteurs électriques sont des asynchrones. Ils sont basés sur l'entraînement d'une masse métallique par l'action d'un champ tournant, Les moteurs asynchrone triphasé sont des convertisseurs électro-magnétique qui transforment l'énergie électrique fournie par le réseau en énergie mécanique dans la vitesse de rotation  $N$  pour une fréquence donnée 'F' dépend de la charge.

La machine asynchrone est constituée de deux armatures coaxiales : une armature fixe dite stator et une armature mobile dite rotor.

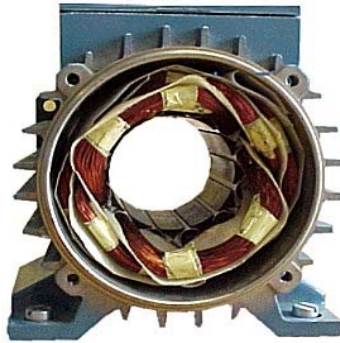
- ✚ le stator est relié au réseaux ou variateur de vitesse ;
- ✚ le rotor est constitué de conducteurs en court circuit qui sont parcourus par des induit par le champ magnétique créé par les courants statorique ;
- ✚ Les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous ensembles.

### 1.3.1 Stator :

Les différents types de moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor; dans tous les cas le stator reste, au moins dans son principe, le même. Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique. Ce circuit magnétique est constitué d'un

empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine et canalisées le flux magnétique.

On utilise des tôles minces dont l'épaisseur varie entre 0.35 et 0.50mm pour minimiser les pertes dans le circuit magnétique. De plus, afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on isole habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude. [4],



**Fig. 1.2** Stator d'une machine asynchrone

### **1.3.1.1 Enroulement et encoches du stator :**

Le stator des machines petites et moyennes, à basse tension, est exécuté avec des encoches semi-ouvertes et celui des autres machines, le plus souvent, avec des encoches ouvertes. Le type d'enroulement préféré est celui à deux couches, auquel on recourt toujours lorsqu'on a des encoches ouvertes. Comparativement à l'enroulement à une couche, il offre l'avantage de pouvoir être exécuté comme un enroulement à pas partiel (ou à pas raccourci); de ce fait, les factures d'enroulements des harmoniques supérieures sont fortement diminuées. Un autre avantage de cet enroulement est la faible hauteur radiale de la tête d'enroulement qui limite les pertes additionnelles dans l'espace frontal. Vu les pertes par pulsation du flux dans le fer des dents, on doit, dans le cas d'encoches ouvertes, choisir le nombre d'encoche du stator supérieur à celui du rotor, [5].

Dans les machines électriques à courant alternatif on distingue plusieurs types d'enroulements :

- ✚ Enroulement à une couche ;
- ✚ Enroulement à deux couches ;
- ✚ Enroulement à une-deux couches.

### **1.3.2 Rotor :**

Le rotor est constitué comme le stator de tôles empilées et habituellement du même matériau. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur

un arbre. Dans de plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections montées sur un moyeu .on peut distinguer 4 type de rotor :

#### **1.3.2.1 Rotor bobiné :**

Le rotor comporte un enroulement bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôle empilés sur l'arbre de la machine. Cet enroulement est obligatoirement polyphasé, même si le moteur est monophasé, et en pratique toujours triphasé à couplage en étoile. Les encoches découpées dans les tôles sont légèrement inclinées par rapport à l'axe de la machine de façon à réduire les variations de réluctance liées à la position angulaire rotor/stator et certaines pertes dues aux harmoniques.

Les extrémités des enroulements rotoriques sont sorties et reliées à des bagues montées sur l'arbre, sur les quelles frottent des balais en carbone. On peut ainsi mettre en série avec le circuit rotorique des éléments de circuit complémentaire (résistances, électronique de puissance) qui permettent des réglages de la caractéristique couple/vitesse. Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles et/ou nombreux ; en effet les pertes rotors pendant la phase de démarrage valant approximativement  $1/2JW^2$  ne sont pas toujours supportées par les cages, [2].

#### **1.3.2.2 Rotor a cage d'écureuil :**

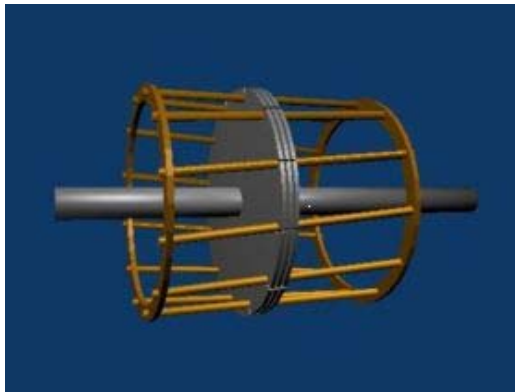
Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil.

Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur. Dans certaines constructions, notamment pour des moteurs à basse tension (par exemple 230/400V), la cage est réalisée par coulée et centrifugation d'aluminium.

On démontre que, si le nombre de barres est suffisamment grand (soit en pratique,  $N_b \sim 8xp$ ) la cage se transforme automatiquement en un circuit polyphasé de polarité adéquate.

Ce type de moteur est beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné est par conséquent d'un prix de revient inférieur et à une robustesse intrinsèquement plus grande. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie du parc de s moteurs asynchrones actuellement, [2].



**Fig. 1.3** Structure d'un rotor en cage d'écureuil

❖ **Caractéristique du rotor a cage :**

- ✚ Durée de vie très élevée; maintenance quasi inexistante (paliers...);
- ✚ Vitesse de rotation dépendant fortement de la charge appliquée sur l'axe;
- ✚ Contrôle électronique de vitesse et de couple complexe.

**1.3.2.3 Rotor a double cage:**

Externe, à résistance relativement élevée, est placée près de l'entrefer. L'autre (en cuivre), interne, de  $p$  lus faible Le rotor comporte deux cages coaxiales. L'une (fréquemment réalisée en laiton ou en bronze), résistance est noyée dans le fer, [2].

**1.3.2.4 Rotor a encoche profonde :**

Le rotor à double cage est beaucoup plus difficile à construire que le rotor à simple cage et est donc d'un coût plus élevé. On peut pallier cet inconvénient, tout en gardant une partie de ses avantages, en construisant une cage rotorique simple avec des barres très plates s'enfonçant profondément dans le circuit magnétique.



**Fig. 1.4** Tôle utilisée pour la réalisation d'une cage à double encoche



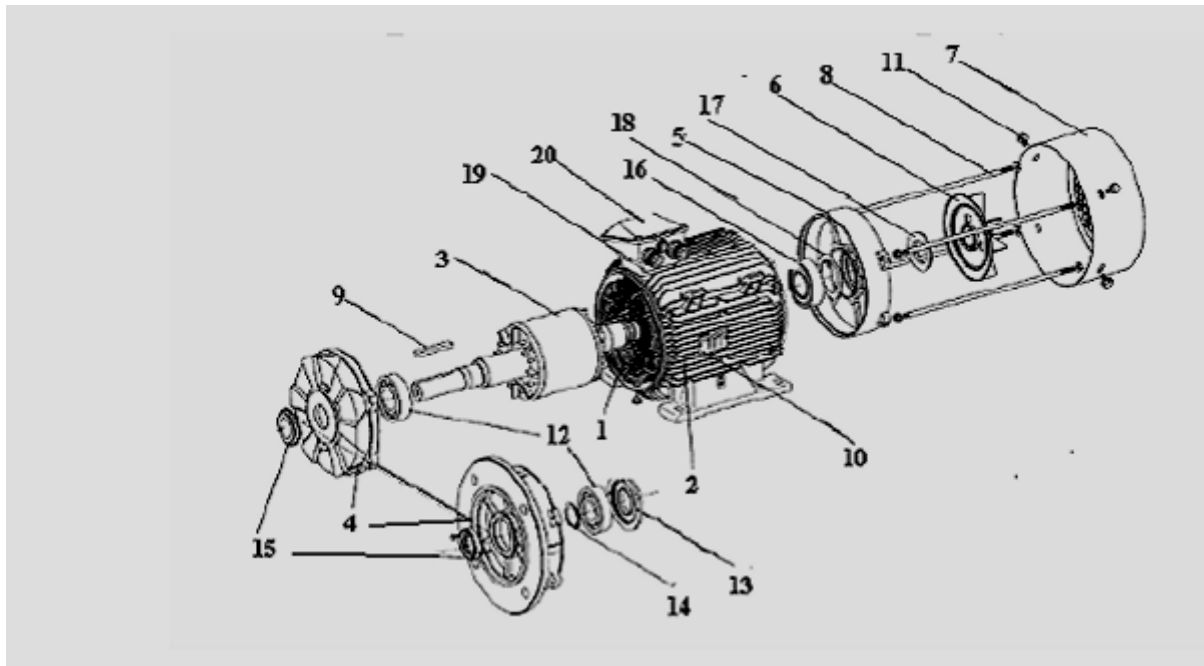
**Fig. 1.5** Coupe d'un rotor à cage à encoches profondes

Ce type de moteur, dit à encoches profondes, est très utilisé, notamment dans le cas des moteurs à haute tension à fort couple de démarrage. Il présente cependant l'inconvénient d'entraîner une

augmentation du coefficient de dispersion des enroulements, donc une diminution du facteur de puissance du moteur, et bien sûr, d'exiger un diamètre de rotor plus important, [2].

### 1.3.3 Les organes mécaniques :

Le stator autoporteur reçoit de chaque côté un flasque sur lequel le rotor sera positionné grâce à des roulements à billes ou à rouleaux suivant le type de charge (axial ou radial). Un ventilateur est placé en bout d'arbre sur le rotor pour le refroidissement de la machine. Il peut être remplacé par une ventilation forcée motorisée pour le refroidissement aux vitesses très lentes.[6]



- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| 1 : Stator bobiné                    | 11 : Vis de fixation du capot            |
| 2 : Carcasse                         | 12 : Roulement côté accouplement         |
| 3 : Rotor                            | 13 : Chapeau intérieur côté accouplement |
| 4 : Flasque côté accouplement        | 14 : Circlips de côté accouplement       |
| 5 : Flasque arrière accouplement     | 15 : Joint côté accouplement             |
| 6 : Ventilateur                      | 16 : Roulement arrière                   |
| 7 : Capot d ventilation accouplement | 17 : Joint arrière                       |
| 8 : Tiges de montage                 | 18 : Rondelle de précharge               |
| 9 : Clavette                         | 19 : Corps de boîte à bornes             |
| 10 : Plaque signalétique             | 20 : Couvercle de boîte à bornes         |

Fig. 1.6 Les organes de la machine asynchrones

### 1.4.1 Choix du membre d'encoches :

Le choix du nombre d'encoches du stator et du rotor obéit à des contraintes de nature géométrique et électromécanique. Les contraintes géométriques sont avant tout liées à la mise en place du bobinage statorique. Pour limiter les coûts, un certain rapport hauteur/largeur d'encoches (2 à 4) doit être adopté. De plus, le pas d'encoche doit s'accroître avec le diamètre d'alésage.

Le choix du nombre d'encoches statoriques est lié au nombre de pôles et au nombre de phases ainsi qu'aux contraintes géométriques.

Le choix du nombre d'encoches rotoriques est lié au nombre d'encoches statoriques et doit être tel que les effets réluctances (influence de la variation des perméances de dents) soient minimisés afin de réduire le bruit et les couples parasites et d'éliminer toute attraction unilatérale, [7].

#### **1.4.2 l'Entrefer :**

Pour des raisons mécaniques, on choisit l'entrefer aussi grand que possible. Un entrefer assez grand est également avantageux pour ce qui est des pertes supplémentaires dans le fer, produites par les pulsations du champ, et de la dispersion provoquée par les champs harmoniques supérieurs. En revanche, eu égard au courant magnétisant (facteur de puissance) l'entrefer doit être maintenu aussi faible que possible.

Dans les machines ayant un nombre de paires de pôles =12, l'épaisseur de l'entrefer dépend exclusivement des exigences mécaniques. Un dimensionnement économique de la carcasse et de l'arbre exige le maintien d'un rapport déterminé de l'entrefer à l'alésage, [7].

#### **1.4.3 l'Isolation :**

L'isolation du conducteur est en papier et en coton ; l'augmentation d'épaisseur du conducteur se monte à 0.6 mm dans le sens de la largeur et à 0.7 mm dans celui de la hauteur (compte tenu du fait que pour le rapport relativement grand des côtés du conducteur, soit  $6.9/2.6=2.65$ , l'isolation sur le côté long, n'adhère pas aussi bien que sur le côté court).

L'enroulement est isolé par rapport au fer des dents au moyen d'une gaine de 1,9 mm d'épaisseur. A la tension nominale de 3000 V, il n'est pas encore nécessaire d'imprégner l'enroulement sous vide. Pour chaque côté de bobine, il y'a 8 conducteurs disposés les uns au-dessus des autres. Etant donné l'isolation relativement épaisse des conducteurs, il n'est pas nécessaire de disposer des intercalaires spéciaux entre eux. Les deux cotés de bobine sont séparés par une feuille de presspahn de 2,5 mm d'épaisseurs, [7].

### **1.5 Schéma équivalent :**

La machine asynchrone est présentée par plusieurs modèles, le schéma équivalent de la machine asynchrone à simple cage d'écureuil sans pertes fer le plus proche du modèle physique est celui du type transformateur ramené au stator dans lequel les fuites statoriques et rotoriques sont représentées séparément, comme illustré par la Fig. 1.7. Ce schéma est obtenu grâce à une transformation de Park de l'ensemble des grandeurs électriques du système triphasé (réelle), composé de deux circuits couplés électromagnétiquement en grandeurs équivalentes en système biphasé, sous les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ✚ Le circuit magnétique n'est pas saturé.
- ✚ Les inductances mutuelles entre deux enroulements varient sinusoidalement, en fonction de l'angle entre les axes magnétiques.
- ✚ L'entrefer est constant.

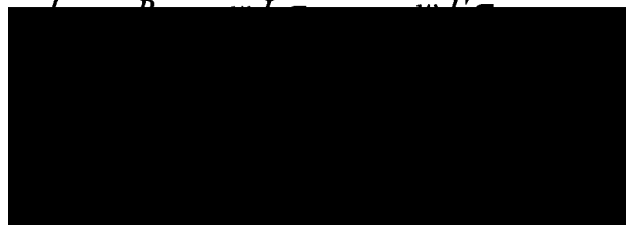


Fig. 1.7 Schéma équivalent de type transformateur

## 1.6 Principe de fonctionnement :

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques, c'est dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme.

L'enroulement au rotor est donc soumis à des variations de flux (champ magnétique). Une force électromotrice induite apparaît qui crée des courants rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux : loi de Lenz. Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique, [3].

La machine est dite asynchrone car elle est dans l'impossibilité, sans la présence d'un entraînement extérieur, d'atteindre la même vitesse que le champ statorique. En effet, dans ce cas les courants s'annulent de même que le couple qu'ils produisent et la machine n'est entraînée. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée vitesse de glissement

### 1.6.1 Caractéristiques de fonctionnement :

#### 1.6.1.1 Fonctionnement à vide

A vide le moteur n'entraîne pas de charge.

##### ✚ Conséquence :

Le glissement est nul est le moteur tourne à la vitesse de synchronisme.

A vide  $g = 0$  et donc  $n_o = n$

##### ✚ Autres observations :

Le facteur de puissance à vide est très faible ( $<0,2$ ) et le courant absorbée reste fort (P est petit et Q est grand). On parle alors de courant réactif ou magnétisant (ils servent à créer le champ magnétique), [8].

### 1.6.1.2 Fonctionnement en charge

Le moteur fournit maintenant de la puissance active, le stator appelle un courant actif.

**Remarque :** le moteur asynchrone est capable de démarrer en charge, [8].

### 1.6.2- Caractéristique mécanique du moteur asynchrone $C = f(n)$ :

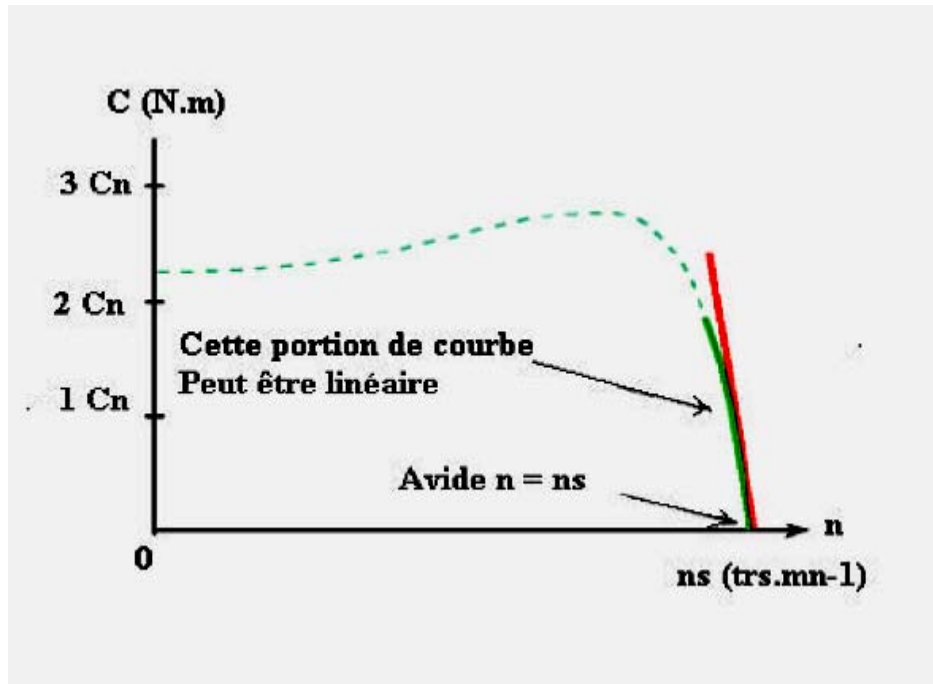


Fig. 1.8 Caractéristique mécanique d'un moteur asynchrone

**Légende :**

$C_n$  Couple nominal ; ----- Couple de démarrage du moteur ;

On constate que ce couple est fort : la machine peut démarrer en charge ;

— Zone de fonctionnement du moteur ; On constate qu'elle est presque linéaire ; Cette partie de la courbe est très verticale : la vitesse varie peu avec la charge.

— La Zone de fonctionnement peut être modélisée par une droite, [8].

### 1.7 Vitesse et glissement:

La fréquence de rotation de champ tournant (vitesse synchrone) est donnée par l'expression suivante :

$$n = \frac{f}{p} \quad (1.1)$$

$f$  Fréquence du réseau triphasé en Hz ;

$n$  Fréquence de rotation en tours/seconde ;

$p$  Nombre de paires de pôles créées par le Stator, [9].

### 1.7.1 Vitesse angulaire :

$$\Omega = 2\pi.n = 2\pi.\frac{f}{p} = \frac{\omega}{p} \quad (1.2)$$

$\omega$  Pulsation en rd/s ;

$\Omega$  Vitesse angulaire en rd/s , [9].

### 1.7.2 Glissement :

Le rotor tourne un peu moins que le champ tournant; en notant  $n'$  sa fréquence (ou vitesse) de rotation et  $\Omega'$  sa vitesse angulaire.

On appelle  $g$  glissement d'un moteur asynchrone le rapport de la fréquence (ou vitesse) de glissement  $n_g$  à la fréquence (ou vitesse) synchrone  $n$ .

$$g = \frac{n_g}{n} = \frac{n-n'}{n} = \frac{\Omega-\Omega'}{\Omega} \quad (1.3)$$

Examinons les différents cas possibles :

- ✚  $g = 0$  pour  $n' = n$  il n'y a pas de couple.
- ✚  $g < 0$  pour  $n' > n$  la machine fonctionne en génératrice.
- ✚  $g > 0$  pour  $n' < n$  la machine fonctionne en moteur.
- ✚  $g = 1$  pour  $n' = 0$  la machine est à l'arrêt ou à l'instant du début du démarrage
- ✚  $g > 1$  pour  $n' < 0$  la vitesse de rotation est l'inverse de celle du champ tournant (de freinage), [9].

## 1.8 MAS en fonctionnement réversible - génératrice asynchrone :

La caractéristique statique d'une MAS est réversible. On en déduit que cette machine peut fonctionner en génératrice ; pour  $g < 0$  ("hyper synchronisme" :  $\Omega > \Omega_s$ ). Le rotor d'une génératrice asynchrone est généralement à cage d'écureuil ( $\Rightarrow$  robustesse et faible coût). Consommant de la puissance réactive, elle doit être couplée au réseau ou à une batterie de condensateurs dans le cas d'une utilisation isolée. Son emploi est réservé aux générateurs de puissance moyenne dont l'arbre d'entraînement tourne à des vitesses fortement variables : mini centrale hydraulique, éolienne, turbine ou moteur à gaz de récupération, certains groupes électrogènes, [4].

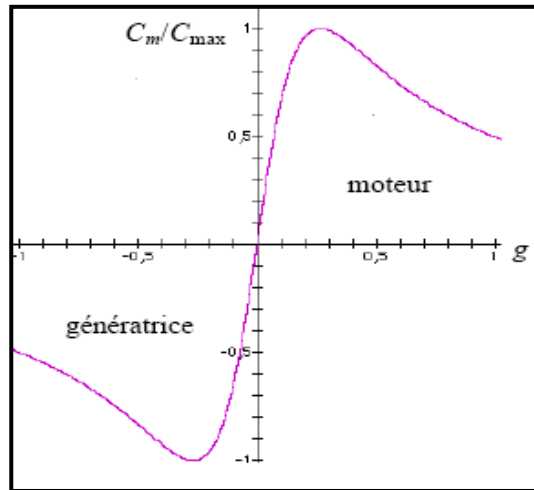


Fig. 1.9 Fonctionnement réversible - génératrice asynchrone

## 1.9 Les pertes dans les machines asynchrones :

Les pertes dans une machine électrique peuvent être divisées en trois parties ;

- ✚ Les pertes dans les circuits électriques ;
- ✚ Les Pertes dans le circuit magnétique ;
- ✚ Les Pertes mécanique.

### 1.9.1 Les pertes dans les circuits électriques :

#### 1.9.1.1 Pertes nominales en basse fréquence

Tout conducteur de résistance  $R$  parcouru par un courant continu ou alternatif de valeur efficace  $I$  est le siège de pertes par effet Joule qui valent :

$$P_j = RI^2 \quad (1.4)$$

En basse fréquence et pour les conducteurs de sections filiformes, la densité de courant est uniformément répartie dans toute la section du conducteur.

La résistance d'un enroulement, réalisé à l'aide de fils fins de résistivité  $\rho$ , de section nue  $s$  et constitué de  $Ns$  spires en série, chacune de longueur moyenne  $L_{moy}$  et formant  $a$  voies en parallèle, vaut (à fréquence nulle) :

$$R_0 = \rho \cdot \frac{L_{moy} \cdot Ns}{a \cdot s} \quad (1.5)$$

La résistivité  $\rho$  doit être celle qui correspond à la température de fonctionnement  $\theta_2$  de l'enroulement selon la loi :

$$\rho(\theta_2) = \rho(\theta_1) \frac{1 + \alpha \cdot \theta_2}{1 + \alpha \cdot \theta_1} \quad (1.6)$$

Avec :

$\alpha$  Coefficient caractéristique du matériau ;

$\rho(\theta_1)$  Résistivité à la température  $\theta_1$ , [10].

### 1.9.1.2- Pertes supplémentaires à fréquence élevée :

#### 1.9.1.2.1- Cas des courants sinusoïdaux :

Lorsque le courant, qui parcourt un conducteur, est sinusoïdal à fréquence  $f$  élevée, la densité de courant dans une section droite du conducteur n'est plus uniforme (effet Kelvin). Cela est dû à l'action du flux propre interne du conducteur qui rejette le courant vers la périphérie de celui-ci. La résistance du conducteur se réduit à celle d'une couronne d'épaisseur  $\delta_{el}$ , dite *de peau*, qui est définie par l'équation :

$$\delta_{el} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu.f}} \quad (1.7)$$

Avec :

$\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$  Perméabilité égale à celle du vide pour les conducteurs non magnétiques habituels. Par rapport au fonctionnement en basse fréquence, il en résulte un accroissement de sa résistance et de son inductance et donc un accroissement des pertes Joule pour un même courant transporté, [10].

#### 1.9.1.2.2 Cas des courants non sinusoïdaux :

Pour les courants alternatifs non sinusoïdaux, les conducteurs étant généralement des matériaux à caractéristiques linéaires, il suffit de calculer la résistance  $R_i$  correspondant à chaque fréquence  $f_i$  des termes de la série de Fourier composant le courant et d'additionner les pertes dues à chaque harmonique sous la forme :

$$p_j = \sum_{i=1}^n R_i \cdot I_i^2 = R_o \cdot I_1^2 \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{R_o} \left( \frac{I_i}{I_1} \right)^2 = p_{j1} \cdot k_f \quad (1.8)$$

Avec :

$P_{j1}$  Pertes dues au fondamental  $I_1$  du courant ;

$k_f$  Coefficient dû aux harmoniques (pour des courants en créneaux,  $k_f$  est de l'ordre de 8 à 10%, [10].

### 1.9.2 Les Pertes dans le circuit magnétique :

#### 1.9.2.1 Les pertes magnétiques de fer $P_{fer}$ :

Les alliages ferromagnétiques utilisés dans les circuits magnétiques sont communément appelés fer, étant donné le fort pourcentage de fer dans ceux-ci.

Les pertes magnétiques de fer ou pertes fer subdivisent en deux catégories:

### 1.9.2.1.1 Les pertes par courant de Foucault $P_f$ :

Les pertes par courant de Foucault dans ces alliages résultent, selon la loi de Faraday, des variations temporelles des flux qui induisent des forces électromotrices dans leur masse. Ces fém. générées dans ces alliages conducteurs, de résistivité voisine de  $50 \cdot 10^{-8} \Omega m$ , donnent naissance à des courants qui se ferment dans la masse du fer dans des plans normaux à la direction du flux. le phénomène est analogue à celui qui génère des courants dans une boucle fermée conductrice traversée par un flux variable, la masse du fer pouvant être décomposée, par la pensée, en un ensemble de boucles fermées conductrices.

Ces courants sont constitués par le mouvement des électrons libres du matériau magnétique, du fait de l'action du champ électrique local, que l'on peut déduire des équations de Maxwell à partir du champ magnétique d'excitation, comme dans tout conducteur excité par une fém.

$$P_f = k_r \cdot (e \cdot f \cdot B_m^2) \quad (1.9)$$

Avec :

$P_f$  Pertes par courant de Foucault ;

$e$  Epaisseur de la tôle ;

$f$  Fréquence de l'induction (Hz) ;

$k_r$  Coefficient caractéristique de tôle, [10].

### 1.9.2.1.2 Les pertes par Hystérésis ou pertes Hystérétiques $P_h$ :

Les pertes par hystérésis ou pertes hystérétiques résultent, sous l'effet de la variation en intensité et/ou en direction du champ magnétique appliqué, de transformations de l'organisation de la matière en domaines de Weiss dans lesquels l'aimantation est uniforme en direction et module, les moments magnétiques des atomes d'un domaine étant colinéaires.

La variation de la magnétisation provoque des déplacements, des suppressions ou des créations de parois entre domaines qui tendent à orienter leurs moments dans le sens du champ appliqué. Ces transformations irréversibles se font avec apparition d'hystérésis et absorbent de l'énergie.

$$P_h = k_h \cdot f \cdot B_m^2 \quad (1.10)$$

$k_h$  Coefficient de pertes par hystérésis.

Les deux termes de pertes ne sont pas indépendants du fait qu'il s'agit du même champ appliqué et de la même induction locale à laquelle les deux phénomènes participent, chacun à sa manière.

$$P_{fer} = P_h + P_{ch} \quad (1.11)$$

### **1.9.3 Les Pertes mécanique :**

#### **1.9. 3.1 Pertes par frottement :**

##### **1.9. 3.1.1 Pertes par frottement dans les paliers :**

Dépendent du type de palier (lisse ou à roulements) et de la lubrification. Dans les petites machines, on obtient des pertes acceptables en utilisant des roulements à billes ou à galets lubrifiés avec de la graisse consiste. Dans les grosses machines, on utilise des paliers à friction briffés, pour réduire le frottement, avec des huiles minérales. Toutes choses étant égales par ailleurs, les pertes par frottement, dans les paliers croissent avec l'augmentation de la vitesse de rotation, de la masse du rotor et du diamètre du tourillon dans la zone du palier, [10].

##### **1.9. 3.1.2 Pertes par frottement dans les roulements :**

Les pertes mécaniques, dues aux frottement dans les roulements, ont des origines très diverses, elles proviennent :

- ✚ Des contacts corps roulants chemin de roulement, corps roulants cage, cage bagues ;
- ✚ Du barattage (brassage) du lubrifiant ;
- ✚ Des joints intégrés aux roulements.

Ces frottements dépendent de nombreux facteurs :

- ✚ Type de lubrification (graisse, barbotage ou injection d'huile);
- ✚ Viscosité, voir la rhéologie (Viscosité élasticité) du lubrifiant ;
- ✚ Type de géométrie interne du roulement ;
- ✚ Charge et vitesse de rotation auxquelles les roulements sont soumis.

L'évaluation des pertes par frottement dans les roulements ou les joints peut être effectuée de deux manières :

- ✚ Par l'utilisation de formules simples issues de l'expérience et largement diffusées par les Constructeurs de roulement ;
- ✚ Par le calcul des pertes élémentaires pour chaque contact interne, cette démarche est encore du domaine de la recherche et est employé lorsque les roulements sont sollicités sous des conditions très sévères, par exemple dans l'aéronautique, cette méthode est très lourde à mettre en œuvre, [10].

##### **1.9. 3.1.3 Pertes aérodynamiques :**

Le fluide gazeux, confiné dans le volume de l'entrefer d'une machine, frotte sur la surface du rotor en mouvement. Lorsque la vitesse périphérique du rotor est importante, ce frottement est source de pertes non négligeables à la surface du rotor, d'autant plus que la pression dans l'entrefer est élevée, [10].

#### 1.9. 3.1.4 Pertes aux contacts balais - collecteur et balais-bague :

Exprime de préférence en fonction de la pression d'appui des balais  $P_b$  de la surface  $S_b$  et de la vitesse tangentielle du collecteur  $V_c$  (en m/s) ou des bagues. On obtient (en W) :

$$P_b = 1.11 \cdot f_b \cdot P_b \cdot S_b \cdot V_c \quad (1.12)$$

Avec :

$P_b (N/cm^2)$  Donné par le fabricant (1,8 à 2,2  $(N/cm^2)$  pour les balais des machines à collecteur et 1,5  $(N/cm^2)$  pour les balais sur bagues) ;

$S_b (cm^2)$  Surface de toutes les lignes de balais ;

$f_b$  Coefficient de frottement, donné par le fabricant de balais, et de valeur moyenne égale à 0,2, [10].

#### 1.9. 3.2 Pertes par ventilation :

Ces pertes sont difficiles à évaluer avec précision avec des moyens simplifiés. Les écoulements, en principe laminaires, sont ici perturbés par les têtes de bobines, les encoches, etc, ce qui entraîne localement des mouvements tourbillonnaires. Cette situation est favorable au refroidissement, mais rend le calcul délicat. Les méthodes de calcul actuelles des écoulements, qui résolvent les équations de Navier-Stokes complètes, peuvent en principe appréhender des géométries complexes à l'aide des techniques d'éléments finis. La nature turbulente de l'écoulement complique très fortement l'étude. Cependant, des modèles qui décrivent les tensions turbulentes, avec des viscosités turbulentes (hypothèse de Boussinesq) donnent des résultats intéressants.

La situation est moins complexe dans les grandes machines où les obstacles à la circulation de l'air sont relativement moins importants que dans les petites.

Les constructeurs utilisent encore souvent les résultats de mesures effectuées sur de nombreuses machines, présentés soit sous forme d'abaques en fonction de la vitesse et de la puissance utile ou du diamètre du rotor, soit sous forme de formules approchées qui donnent, au moins, un ordre de grandeur des pertes cherchées, [10].

## 1.10 Bilan énergétique :

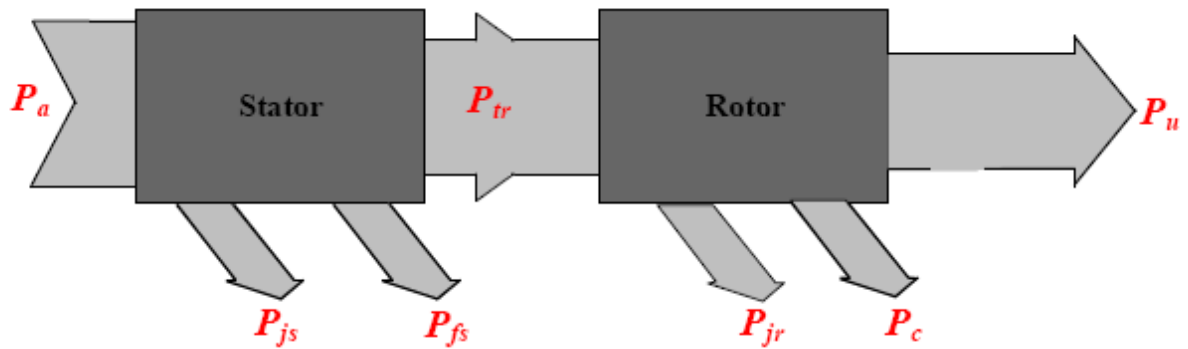


Fig. 1.10 Bilan des puissances pour une machine asynchrone

### 1.10.a) Bilan des puissances au stator :

- ◆ Puissance électrique absorbée par le stator:

$$P_a = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi \quad (1.13)$$

- ◆ Pertes par effet Joule dans le stator:

$$P_{js} = \left( \frac{3}{2} \right) \cdot r \cdot I^2 \quad (\text{Quel que soit le couplage})$$

$$P_{js} = 3 \cdot R \cdot I^2 \quad (\text{Cas du couplage étoile})$$

$$P_{js} = R \cdot I^2 \quad (\text{Cas du couplage triangle})$$

$R$  : résistance de l'enroulement statorique ;

$r$  : résistance mesurée entre deux bornes.

- ◆ Pertes fer (pertes par Hystérésis et par courants de Foucault):  $P_{fer}$

- ◆ Puissance transmise au rotor:

$$P_{tr} = P_a - (P_{js} + P_{fs}) \quad (1.14)$$

### 1.10.b) Bilan des puissances au rotor :

- ◆ Pertes par effet Joule dans le rotor:

$$P_{jr} = g \cdot P_{tr} \quad (1.15)$$

◆ **Pertes constantes:** pertes mécaniques + pertes fer:  $P_c$

◆ Puissance mécanique utile:

$$P_u = P_{tr} - (P_{js} + P_c) \quad (1.16)$$

**1.10-c) Bilan total des puissances :**

$$P_a = P_u + P_{js} + P_{jr} + P_{fs} + P_c \quad (1.17)$$

**1.11- Rendement du moteur asynchrone :**

Le rendement d'une MAS ainsi calculé est le rendement théorique de la machine. Ce rendement de la seule transmission asynchrone ne tient pas compte des autres facteurs de pertes, [9].

$$\eta = \left( \frac{P_u}{P_a} \right) = 1 - \frac{\sum \text{pertes}}{P_a} \quad (1.18)$$

**1.12- Avantages et Inconvénients d'Utilisations des moteurs asynchrones :**

✚ **Avantages :**

- La moteur asynchrone est facile à réaliser et très robuste ;
- Il n'y a pas d'alimentation du rotor donc aucun problème d'usure de collecteur ;
- Sauf pour des charges élevées, le démarrage est autonome.

✚ **Inconvénients :**

- La vitesse de rotation n'est pas parfaitement stable ;
- Le domaine de puissance est limité à 10MW.

✚ **Utilisation :**

- Le moteur asynchrone triphasé, dont la puissance varie de quelques centaines de watts à plusieurs mégawatts est le plus utilisé de tous les moteurs électriques ;
- Son rapport **coût/puissance** est le plus faible ;
- Associés à des onduleurs de tension, les moteurs asynchrones de forte puissance peuvent fonctionner à vitesse variable dans un large domaine (TGV Eurostar : 12 fois 1020kW).
- bobinages. Il est alors possible de changer le nombre de paires de pôles et donc la vitesse.

### **1.13 Conclusion:**

La machine asynchrone fait actuellement l'objet d'un intérêt accru dans plusieurs applications ce ci étant dû essentiellement à sa fiabilité, son faible coût d'achat, sa robustesse et sa simplicité mais sa commande est relativement complexe, le couple et le flux sont fortement couplés car les deux grandeurs dépendant à la fois du courant statoriques, ce ci donne à la machine son caractère de processus multi- variable et non linéaire.

Dans le deuxième chapitre, on va démontré que la CAO n'est qu'un outil, mais elle modifie l'exercice de la profession de l'ingénieur et permet de faire un meilleur travail dans le domaine des structures, les programmes d'analyses sont devenus très précis et complet de manière a ce que le comportement d'élément telles les poutres peut être analysé avec beaucoup plus de fiabilité et de détails qu'avec les formules empiriques utilisées auparavant.

**Chapitre deux**  
**La Conception des machines**  
**asynchrones**

## 2.1 Introduction :

La conception est un exercice plutôt futile, et nous avons préféré une explication plus proche du travail de l'ingénieur. Il s'agit d'imaginer, de formuler des solutions pour remplir des fonctions bien définies à l'intérieur d'un ensemble de contraintes. Généralement, l'atteinte d'une solution (d'un design) n'est pas directe sauf pour des problèmes extrêmement simples.

Le processus est plutôt itératif de façon simpliste, on distingue d'abord le choix d'un modèle représentant le phénomène physique du problème. Ensuite, un premier design est élaboré et on vérifie si les contraintes sont satisfaites.

On peut décrire la conception ou le design comme un processus itératif au cours duquel un objet est conçu et modifié afin qu'il puisse remplir des fonctions bien définies et se conformer à un ensemble de contraintes, [11].

La conception des machines asynchrones recouvre un domaine d'activité très vaste qui va de la machine de quelques watts de puissance destinée à des applications informatiques jusqu'au moteur de quelques mégawatts implanté dans des procédés industriels lourds. Il n'est pas possible de couvrir, dans les limites de cet article, la diversité de l'approche de l'ensemble de ces applications, ce qui nous conduit à nous restreindre aux machines polyphasées de taille moyenne. Cependant, dans cette seule catégorie qui recouvre la plupart des applications industrielles, le cadre dans lequel se déroule la conception est d'une très grande variété qui inclut la conception de gammes normalisées de machines destinées à la constitution d'un catalogue, mais aussi, ce qui est de plus en plus fréquent de nos jours, la réponse à la commande d'un client pour une utilisation spécifique, [12].

L'établissement du projet d'une machine électrique commence par le choix des dimensions et des matériaux de ses parties actives et constructives et en premier lieu de ses dimensions principales: du diamètre  $D$  et de la longueur de calcul de l'armature magnétique de l'induit. Après cela, on effectue les calculs électromagnétiques, mécanique. A la suite de ces calculs, on apporte, s'il y a lieu, des corrections nécessaires dans les dimensions choisies primitivement et on choisit des matériaux présentant d'autres propriétés. Puis on reprend tous ces calculs jusqu'à ce qu'on obtienne une variante qui répond entièrement aux exigences énoncées dans le Cahier de charge, [2].

## 2.2 Méthode de conception :

### 2.2.1 Organigramme de calcul :

La procédure de calcul d'une machine électrique est résumée dans l'organigramme suivant :

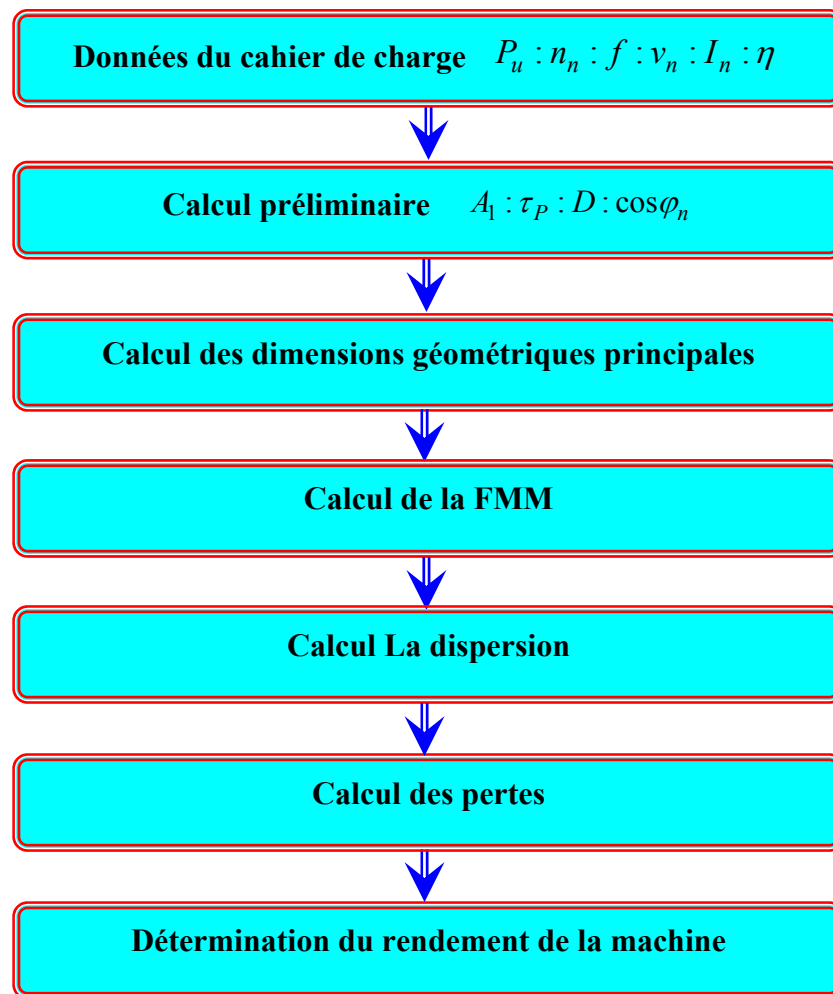


Fig. 2.1 Organigramme de conception d'une machine asynchrone

#### 2.2.1.1 Cahier de charge :

Les données du cahier des charges sont principalement les performances de la machine au point de fonctionnement nominal ( $P_u : n_n : f : v_n : I_n : \eta$ ).

#### 2.2.1.2 Calcul préliminaire :

La construction de la machine électrique ne doit pas seulement tenir compte de ses propriétés électromagnétiques, mais faire en sorte que son type de construction et son exploitation soient économiques et rentables.

Le dimensionnement d'une machine électrique dépend , tant du point de vue magnétique que de vue électrique , d'une série de facteurs liés en partie aux propriétés thermiques des matériaux isolants et, en partie à la durée de vie , ainsi q'aux exigences de l'exploitation .

Les facteurs qui influent sur le dimensionnement ne sont pas les mêmes pour tout les types de la machine à construire, par exemple dans la machine asynchrone ce sont : les conditions de démarrage, la capacité de surcharge, le facteur de puissance et le rendement qui sont déterminants

Dans la détermination des dimensions principales des machines à courant alternatif, il est indiqué de prendre pour base la puissance apparente ( $P_s$ ). La liaison entre les dimensions principales et les contraintes, tant électriques que magnétiques, est donnée par la relation, [5].

$$\frac{P_s \cdot 10^{-3}}{l_i \cdot D^2 \cdot 60 \cdot n} = \frac{k_{\omega 1} \cdot A_1 \cdot \hat{B}_\sigma}{8,6 \cdot 10^3} = C \quad (2.1)$$

Tel que :

C Coefficient d'utilisation ;

$k_{\omega 1}$  Facteur de bobinage ;

$l_i$  Longueur virtuelle de l'induit ;

D Diamètre du stator à l'alésage ;

$A_1$  Densité linéaire de courant à la périphérie de l'induit tel que :

$$A_1 = \frac{m_1 \cdot 2 \cdot N_1 \cdot I_1}{\pi \cdot D} \quad (2.2)$$

Pour déterminer les dimensions principales de la machine, on part de sa puissance apparente. En désignant par  $P_u$  la puissance de l'arbre (W), le rendement  $\eta$  et le facteur de puissance par  $\cos \varphi$ , la puissance apparente  $P_s$  en VA est exprimée par :

$$P_s = \frac{P_u}{\eta \cos \varphi} \quad (2.3)$$

Le facteur de puissance et le rendement de la machine dépendant de la puissance de celle-ci, ils variant de 0.7 pour les petites machines à 0.5 pour les grandes machines.

Le rendement  $\eta$  et le facteur de puissance  $\cos \varphi$  sont tirés d'après des diagrammes tracés à partir des études statistiques faites sur un grand nombre de moteurs, [5].

Ou par l'expression suivante :

$$\eta = \frac{P_u}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi} \quad (2.4)$$

En exprimant :

$$\tau_p = \frac{\pi D}{2p} \quad (2.5)$$

Tel que :

$\tau_p$  Pas polaire ;

$p$  Nombre de paires de pôles.

Pour pouvoir déterminer, au moyen du coefficient d'utilisation, les dimensions de la machine à partir de la puissance et de la vitesse de rotation, on doit fixer le rapport  $\lambda$  de la longueur virtuelle  $l_i$  de l'induit au pas polaire  $\tau_p$ , [5].

$$\lambda = \frac{l_i}{\tau_p} = \sqrt[3]{p} \quad (2.6)$$

### **2.2.1.3 Calcul des dimensions géométriques principales du rotor –stator :**

#### **2.2.1.3.1 Dimensionnement des encoches :**

Le choix de nombre d'encoche statorique ( $Z_1$ ) est dépendant aux choix de nombre d'encoche par pôle et par phase ( $q$ ), sachant que le nombre de paire de pôle ( $p$ ) et nombre de phases ( $m$ ), [5].

$$Z_1 = 2.p.q.m \quad (2.7)$$

Par contre il n'existe aucune théorie pour le choix de nombre d'encoches rotoriques ( $Z_2$ ). Cependant il existe des tableaux établis à partir d'essais pratiques pour le choix de  $Z_2$  en fonction du nombre de paires de pôles ( $p$ ) et du nombre d'encoches statoriques ( $Z_1$ ). Ces tableaux sont établis pour atténuer les vibrations et assurer une bonne caractéristique mécanique de la machine. La partie de la machine qui fournit le courant magnétisant est pourvue d'un nombre entier d'encoches par pôle et par phase ; car avec un enroulement d'excitation situé dans un nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase, la marche de la machine peut devenir irrégulière.

Le nombre d'encoches ( $q$ ) par pôle et par phase du stator doit être dans tous les cas, supérieur deux ( $q > 2$ ) afin que la dispersion provenant des champs harmoniques supérieurs demeure faible

#### **2.2.1.3.2 L'Entrefer :**

L'entrefer dans la machine présente la réluctance principale dans le circuit magnétique de la machine qui s'oppose au flux magnétique, c'est-à-dire à peu près 80% de la chute de tension magnétique a lieu au niveau de l'entrefer.

Pour limiter le courant absorbé par la machine pendant le fonctionnement à vide on choisit très étroit. On détermine l'épaisseur de l'entrefer en utilisant la courbe qui donne la variation de l'épaisseur en fonction du diamètre extérieur et le nombre de paire de pôles, [10].

#### **2.2.1.3.3 Enroulement de la machine :**

L'enroulement dans toute machines électriques est la pièce maîtresse nécessaire pour la création de champ électromagnétique.

La caractéristique essentielle d'un tel enroulement c'est le nombre d'encoches par pole et par phase ( $q$ ) qui détermine le nombre de bobine dans un groupe, il permet de placer les cotés des bobines ou des sections en précisant à quelle phase ils appartiennent et dans quel sens y passent les courants, [1].

✚ **Facteur de bobinage**  $K_w$  :

$$K_w = K_{p1} \cdot K_{d1} \quad (2.8)$$

Avec:

$K_{p1}$  Facteur de raccourcissement ;

$K_{d1}$  Facteur de distribution.

✚ **Facteur de distribution**  $K_{d1}$  :

$$K_{d1} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2m})}{q \sin(\frac{\pi}{2mq})} \quad (2.9)$$

✚ **Facteur de raccourcissement**  $K_{p1}$  :

$$K_{p1} = \sin \beta \frac{\pi}{2} \quad (2.10)$$

Avec :

$$\beta = \frac{C'}{\tau_p} \quad (2.11)$$

$C'$  Ouverture de la bobine.

#### 2.2.1.4 Calcul de la FMM :

Le calcul du circuit magnétique constitue une partie importante dans la construction des machines électriques, La loi de circulation du champ dans le circuit magnétique constitue la base fondamentale pour ce calcul. Elle définit par : la circulation du champ magnétique  $H$  le long d'une ligne fermée est égale à la somme des forces magnétomotrices (F.M.M) :

$$\oint H \cdot dL = F \quad (2.12)$$

Ou :

$H$  Intensité du champ magnétique exprime en A /m ;

$L$  La largeur de tronçon exprime en (m) ;

$F$  La forces magnétomotrice (F.M.M) exprime en Ampère tours (At) ;

$N$  Nombre de spires par phase parcourues par un même courant I.

La F.M.M totale est égal à la somme des chutes de potentiel magnétique :

$$F_{tot} = 2F_{\sigma} + 2F_{z1} + 2F_{z2} + F_{j1} + F_{j2} \quad (2.13)$$

Ou :

- F.M.M dans l'entrefer :

$$2F_{\sigma} = 2.k_c.\sigma.\frac{\beta_{\sigma}}{\mu_o} \quad (2.14)$$

Ou :

$$\beta_{\sigma} = \frac{\phi_{\delta}}{S_{\delta}} \quad (2.15)$$

- F.M.M dans les dents statorique :

$$2F_{z1} = 2.H_{z1}.h_{z1} \quad (2.16)$$

- F.M.M dans les dents rotorique

$$2F_{z2} = 2.H_{z2}.h_{z2} \quad (2.17)$$

- F.M.M dans la culasse statorique

$$F_{j1} = H_{j1}.l_{j1} \quad (2.18)$$

- F.M.M dans la culasse rotorique :

$$F_{j2} = H_{j2}.l_{j2} \quad (2.19)$$

#### 2.2.1.4.1 Coefficient de saturation :

Le coefficient de saturation  $k_s$  à une grande influence sur les caractéristiques de la machine électrique est définit comme suit :

$$k_s = \frac{F_{\sigma} + F_{z1} + F_{z2}}{F_{\sigma}} > 1 \quad (2.20)$$

L'augmentation de  $k_s$  signifie une saturation dans les dents statorique et rotorique donc une augmentation de la FMM qui engendre une augmentation du courant magnétisant, et une diminution du facteur de puissance,

Le facteur de saturation  $k_s$  pour les machines asynchrones est pris en première approximation entre 1,1 et 1,4, [5].

#### 2.2.1.4.2 Calcul du nombre de spires $NI$ par phase du primaire :

Cette équation donnant La relation entre la F.E.M induite par phase  $E$  et le flux  $\phi$  dans le cas d'une induction

$$E = 4.K_f.f_1.N_1.K_{w1}.\phi \quad (2.21)$$

On peut écrire pour une phase du primaire

$$N_1 = \frac{E_1}{4.K_f.f_1.K_{w1}.\phi} \quad (2.22)$$

#### 2.2.1. 4.3 Coefficient de forme :

On définit le coefficient de forme  $k_f$  par la formule suivante :

$$k_f = \frac{\beta_{\text{eff}}}{\beta_\sigma} \geq 1 \quad (2.23)$$

Avec :

$\beta_{\text{eff}}$  La valeur efficace de l'induction dans l'entrefer ;

$\beta_\sigma$  La valeur moyenne de l'induction dans l'entrefer.

Remarque :

Le coefficient  $k_f$  augmente quand la saturation diminue, [5].

#### 2.2.1.4.4 Facteur de carter (correction de l'entrefer)

Par définition le coefficient de carter  $k_C$  représente le rapport de la valeur d'entrefer  $\delta$  par un entrefer fictif  $\delta'$  tel que :

$$\frac{\delta}{\delta'} = k_c > 1 \quad (2.24)$$

$$F_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} . K_C . \delta = \frac{\phi_\delta}{S_\delta . \mu_0} . K_C . \delta \quad (2.25)$$

#### 2.2.1.5 Courant magnétisant :

L'équation suivante permet de calculer le courant magnétisant :

$$I_m = \frac{p.F_{\text{tot}}}{0,9.m_1.N_1.K_{w1}} \quad (2.26)$$

#### 2.2.1.5.1 Courant de barre et anneau de court-circuitage :

Le courant  $I_2$  est calculé à partir de la puissance mécanique :

$$P_{mec} = P_u + P_{ft+vt} + P_{sup} \quad (2.27)$$

$P$  Puissance utile à l'arbre ;

$P_{ft+vt}$  Pertes par frottement et ventilation ;

$P_{sup}$  Pertes superficielles et par pulsation du flux dans la dent.

La tension induite dans une barre rotorique est égale à la F.E.M du primaire rapportée au secondaire :

$$E_2 = \frac{V_1}{1 + \delta_{H1}} \cdot \frac{N_2 \cdot K_{w2}}{N_1 \cdot K_{w1}} \quad (2.28)$$

Si l'on suppose les pertes à vide et les pertes en charge sont égales, on peut écrire :

$$m_2 I_2 E_2 (1-g) = P_{mec} = P_u + P_{ft+vt} + P_{sup} \quad (2.29)$$

On déduit  $I_2$  :

$$I_2 = \frac{P_u + P_{ft+vt} + P_{sup}}{m_2 I_2 E_2 (1-g)} \quad g \quad (2.30)$$

Etant le glissement estimé ;

$m_2$  Nombre de phase du secondaire.

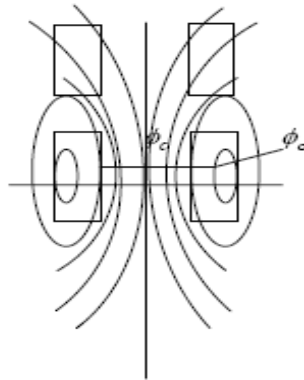
Et le courant d'anneau est :

$$I_{an} = \frac{I_2}{2 \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2}} \quad (2.31)$$

### 2.2.1.5 La dispersion :

Lorsqu'un circuit électrique linéaire est excité par un courant alternatif, il devient le siège d'une F.E.M. d'auto-induction, qui est différent de la F.E.M. induite dans un circuit secondaire (ouvert). La différence entre ces deux F.E.M constitue la F.E.M de dispersion. Celle-ci est due au flux magnétique dispersé, qui agit sur le circuit primaire, mais demeure sans effet sur le secondaire, [5].

Pour les enroulements, les conditions ne sont plus aussi simples (**Fig. 2.1**)



**Fig. 2.2** Illustration de la notion de dispersion

En écrivant des flux de dispersion au flux commun, on obtient le coefficient de dispersion suivant :

$$\delta_{H1} = \frac{(L_1 - M)I_1}{M.I_1} = \frac{L_{\delta 1}}{M} \quad (2.32)$$

$$\delta_{H2} = \frac{(L_2 - M)I_2}{M.I_2} = \frac{L_{\delta 2}}{M} \quad (2.33)$$

$L_1, L_2$  Inductance cyclique d'une phase statorique et rotorique ;

$M$  La mutuelle ;

Le coefficient de dispersion total de **Heyland** est :

$$\delta_H = (\delta_{H1} + \delta_{H2}) + (\delta_{H1} \cdot \delta_{H2}) \quad (2.34)$$

$\delta = \frac{\delta_H}{1 + \delta_H}$  : Est appelé coefficient de dispersion de **Blondel** ou coefficient total de dispersion.

Pour obtenir les formules à employer dans le calcul des inductances et des réactances de fuite des machines électriques, on décompose le flux total de dispersion en trois flux partiels.

- a) Flux de dispersion d'encoche ;
- b) Flux de dispersion différentiel ;
- c) Flux de dispersion des têtes de bobines.

### 2.2.1.5.1 Dispersion d'encoche :

Dans le calcul de la dispersion, on considère que la réluctance du fer est infinie donc la chute de potentiel magnétique est due seulement à l'entrefer qui donne une inductance constante.

La dispersion d'encoche est due au flux de fuite qui se ferme autour de l'encoche en traversant l'encoche, ferme autour de l'encoche en traversant l'encoche, qui ne participe pas au flux commun, [5].

Pour simplifier les calculs de la réactance de fuite d'encoche on fera un raisonnement pour un enroulement à une couche, on négligera aussi l'interaction entre les deux couches puit on fera une correction par la suite.

En tenant compte le déphasage entre les deux courants circulant dans les deux couches supposées dans une même encoche

On aura pour une phase q p encoche :

$$L_{\delta Z} = 2 \cdot \mu_0 \frac{N_1}{pq} L_Z \cdot \lambda_{\delta} \quad (2.35)$$

$$N = pq Z_Z \quad (2.36)$$

$L_Z = l_i$  Longueur active du fer ;

$\lambda_{\delta Z}$  Coefficient de perméance Et la réactance de fuit correspondante est proportionnelle a fréquence  $f$

Où on peut écrire :

$$X_{\delta Z} = 12.56 \cdot f \cdot \frac{N^2}{pq} \cdot \Lambda_{\delta Z} \quad (2.37)$$

$$\Lambda_{\delta Z} = \frac{(\mu_0 \cdot L_Z \cdot \lambda_{\delta Z})}{q} \quad (2.38)$$

$\Lambda_{\delta Z}$  La perméance ;

Pour le grand moteur  $L_Z$  longueur active du fer, est différente de  $L_a$  longueur de la machine, vu la présence des canaux de ventilation sachant que le coefficient de perméance  $\lambda_{\delta Z}$  est :

$$\lambda_{\delta Z} = \frac{h_1}{3 \cdot b_Z} + \frac{h_2}{b_Z} + \frac{h_3}{b_3} + \frac{h_4}{b_4} \quad (2.39)$$

### 2.2.1.5.2 Réactance de fuite différentielle

Pour pouvoir déterminer la réactance de fuite différentielle il faut sommer l'influence des harmoniques supérieures d'ordre  $v$  ;

Pour un enroulement statorique à  $m$  phases et  $q$  encoches par pôle et par phase.

$$\Lambda_{\sigma d1} = \frac{m_1}{2} \cdot \tau_p \cdot I_i \cdot \frac{\mu_0}{k_c \cdot k_s} \sum \left( \frac{k_{wc}}{v} \right)^2 \quad (2.40)$$

$\sum \left( \frac{k_{wc}}{v} \right)^2$  Est donné par un tableau en fonction du raccourcissement du pas  $\frac{c}{\tau_p}$  et de  $q$  ;

Pour le rotor en court circuit, la réactance de fuite différentielle correspondant au flux de fuite dû aux harmoniques dans le rotor est :

$$\Lambda_{\sigma d2} = \mu_0 \cdot \frac{z_2}{2 \cdot m_2 p} \cdot \frac{m_2}{\pi} \cdot \frac{\tau_p \cdot I_i}{k_c \cdot k_s \delta} \cdot \sum_v \left( \frac{1}{\left( 2 \cdot z_2 \cdot \frac{v}{2p} \right) + 1} \right)^2 \quad (2.41)$$

La valeur des facteurs  $\sum_{\theta}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{2Z_2 \cdot \frac{g}{2p}}$  est donnée, [5].

### 2.2.1.5.3 Réactance de fuite des têtes de bobines

Le calcul de la dispersion des têtes de bobines est fait d'une manière très approximative, les lignes de parcours du flux sont très compliquées. Il y a une grande influence entre les têtes de bobines et la masse de fer voisine, On a :

$$X_{\delta b} = 12,56 \cdot f \cdot \frac{N^2}{p} \cdot \Lambda_{\delta b} \quad (2.42)$$

Le calcul de la perméance est en fonction des dimensions des têtes de bobines.

$$\Lambda_{\delta b} = 1,13 \cdot \mu_0 \cdot k_{vp}^2 \cdot (d_{21} + 0,5 \cdot d_{31}) \quad (2.43)$$

La signification de  $d_{21}$  et  $d_{31}$  est donnée au référence,

Pour déterminer les deux dimensions  $d_{21}$  et  $d_{31}$ , il faut calculer la longueur d'un conducteur pour une petite machine.

$$L_c = L_a + 1,3 \tau_p \cdot \left( \frac{C}{\tau_p} \right) + 5cm \quad (2.44)$$

$$L_{tete} = 1,3 \cdot \tau_p \cdot \left( \frac{C}{\tau_p} \right) + 5cm \quad (2.45)$$

La longueur  $d_{31}$  peut être calculée, si on impose la longueur  $d_{21}$

$$d_{31}^2 = d_{21}^2 - \left( \frac{\tau_p}{2} \left( \frac{C}{\tau_p} \right) \right)^2 \quad (2.46)$$

$$X_{\delta\delta 2} = 12,56 \cdot \frac{f}{2 \cdot p} \cdot \Lambda_{\delta\delta 2} \quad (2.47)$$

$$\Lambda_{\delta\delta 2} = \mu_0 \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot m_1 \cdot p} \cdot \tau_p \cdot g_v \quad (2.48)$$

$g$  Est un facteur qui dépend de la distance entre la tête de bobine du primaire et l'anneau de court-circuitage, des dimensions de l'anneau et du pas polaire  $\tau_p$  :

$$g_v = f \left( \frac{\tau_p}{d_e} \cdot \frac{d_e}{e} \right) \text{ La distance } d_e \text{ est déduite du schéma,}$$

### 2.2.1.6 Calcul des pertes :

La mesure des différentes pertes de puissance de la machine asynchrone permet de calculer son rendement. On peut surtout, utiliser ces grandeurs pour estimer les échauffements des différentes parties de la machine et juger l'efficacité des isolants thermiques et des procédés de refroidissement utilisés. Les diverses pertes sont, [10].

#### 2.2.1.6.1 Pertes par effet de joule ou pertes en cuivre :

Le moteur absorbe une puissance active  $P_a = UI \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\phi$  une partie de cette puissance est dissipée en pertes joule du stator et en pertes dans le fer du stator le reste traverse l'entrefer une partie de cette dernière est dissipée en pertes joule dans le rotor le reste est transformé en puissance mécanique.

##### 2.2.1.6.1.2 Dans le stator :

Les pertes Joule au stator sont données par la relation suivante :

$$P_{js} = m \cdot R \cdot I^2 \quad (2.49)$$

Avec :

$R$  Représente la résistance statorique par phase ;

$I$  Courant de phase ;

$m$  Nombre de phases, [10].

##### 2.2.1.6.1.3 Dans le rotor :

Les pertes Joule au rotor sont données par la relation suivante :

$$P_{cui} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_{2bar}^2 = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2' \quad (2.50)$$

$R_2$  La résistance totale d'une phase du secondaire (résistance d'une barre).

$R'_2$  La résistance totale d'une phase du secondaire ramenée au primaire.

$I'_2$  Courant de barre ramenée au primaire.

$$R_{bar} = \frac{\rho \cdot L_{bar}}{S_{bar}} \quad (2.51)$$

$L_{bar}$  La longueur d'une barre avec une inclinaison égale au pas dentaire statorique  $\tau_{z1}$ , et un dépassement de chaque coté.

$$L_{bar} = \frac{\tau_{z1}}{\sin \alpha} + \hbar \quad (2.52)$$

$\hbar$  Le dépassement.

$$\tan \alpha = \frac{\tau_{z1}}{L_a} \cdot \alpha = \arctg \frac{\tau_{z1}}{L_a} \quad (2.53)$$

La résistance de l'anneau :

$$R_{an} = \rho \cdot \frac{L_{an}}{s_{an}} \quad (2.54)$$

La longueur de l'anneau est prise d'une manière approximation :

$$L_{an} = (\tau_p) - \left( \frac{d_b}{2} \right) \quad (2.55)$$

$d_b$  Diamètre de la barre, [10].

### 2.2.1. 6.1.3 Pertes fer

Les pertes dans le fer sont divisées en deux parties :

#### 2.2.1.6.1.3.1 Pertes d'Hystérésis

$$P_h = k_h \cdot f \cdot B_m^2 \quad (2.56)$$

$k_h$  Coefficient de pertes par Hystérésis ;

$B_m$  L'induction maximale dans le fer, [10].

#### 2.2.1.6.1.3.2 Pertes par courant de Foucault :

L'aimantation cyclique alternative engendre des courants induits dans le fer, ces courants sont appelés courants de Foucault.

$$P_w = \sigma_w \cdot (s_t \cdot f \cdot \beta_m)^2 \cdot 10^2 \quad (2.57)$$

$S_t$  L'épaisseur de la tôle du fer;

$\beta_m$  Induction maximale ;

$f$  Fréquence des courants ;

$\sigma_w$  Constante du fer, [10].

### 2.2.1.7 Détermination du rendement de la machine :

Les machines identiques tournant dans des conditions normale qui sont pratiquement les même les pertes couvertes par le réseaux sont considérées comme également réparties et le rendement est calculé à partir de la moitié des pertes totales et de la puissance électrique absorbée la machine .la formule suivante représente le rendement, [2].

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + \sum \text{pertes}} \quad (2.58)$$

### 2.2.1.8 Conclusion :

ce chapitre est consacré à l'exposition de la méthode de calcul des machines asynchrones, qui inclut tous calcul électrique, magnétique et mécanique. Notant que, la détermination successive des paramètres, est basée sur des formules empiriques et des courbes prises lors de plusieurs expériences

**Chapitre trois**  
**les Algorithmes génétiques**

### **3.1 Introduction :**

Pour trouver la solution optimale d'un problème dans un espace complexe implique un compromis entre deux objectifs: l'exploitation des meilleures solution et l'exploration robuste de l'espace de recherche les méthodes de type grimpeur procèdent itérativement en tentant a chaque pas, de trouver localement une solution intermédiaire meilleure que la solution courante, ce genre de méthode est pénalisée par son incapacité a traiter des problèmes représentant des reliefs de solutions multimodales (GA) est une technique de recherche employée en informatique pour trouver les solutions approximatives a l'optimisation les Algorithmes génétiques sont une classe particulière des Algorithmes évolutionnaires qui emploient des techniques inspirées de la biologie évolutionnaire Telle que la mutation, la sélection, et recombinaison (ou le croisement). Les Algorithmes génétiques (AGs) représentant une stratégie de recherche réalisent un compromise équilibre entre l'exploration de l'espace de recherche et l'exploitation des meilleures solutions des analyses théoriques ont montre que les Algorithmes génétiques gèrent ce compromise de façon optimale, [13].

### 3.2 Définitions :

L'optimisation par algorithme génétique prend son origine dans les mécanismes de la sélection naturelle et la génétique de l'évolution. Cette méthode a été mise œuvre par J.H.Holland dans les années 70. Comme son nom l'indique, elle est basée sur la traduction mathématique des phénomènes naturels qui sont la reproduction dans l'espace, la survie et l'adaptation des individus, cette traduction est exploitée pour la résolution de problèmes nécessitant l'optimisation d'une fonction ou d'un système dépendant de plusieurs paramètres et qui ont besoin d'être calculés pour un critère bien défini (maximisation, minimisation,...)

Cette technique constitue une méthode d'optimisation robuste. L'AG peut résoudre, avec fiabilité, des fonctions représentant des reliefs de solution réputés très difficiles pour les méthodes d'optimisation classique (simplex, le plus fort gradient ...). Les fonctions réputées sont des fonctions à plusieurs dimensions ou les méthodes ordinaires ne peuvent pas prendre en compte l'effet d'interaction entre tous les paramètres, [14].

### 3.3 Caractéristique de l'AG

Les principales caractéristiques relatives à cette technique se concentrent autour des trois points

- ❖ Le parallélisme : l'algorithme génétique travaille en parallèle sur un certain nombre de candidats et non pas sur un candidat unique. La méthode de recherche est globale et couvre tout l'espace de recherche ;
- ❖ L'utilisation minimale d'informations: il n'a besoin que de la mesure d'adéquation (la qualité d'une solution), il ne repose sur aucune autre information, par exemple des dérivées ou hypothèses telles que la continuité et la différentiabilité. Il ne requiert qu'une capacité à classer les solutions entre elles ;
- ❖ L'utilisation de règles probabilistes plutôt que déterministes dans l'exploration de l'espace de recherche. L'introduction du hasard est très bénéfique pour l'optimisation de fonctions présentant plusieurs optima et aussi en cas de fonction non permanente (déplacement ou changement des optima au cours du temps).

### 3.4 Principe de fonctionnement :

L'AG est une des méthodes de recherche itératives. Il permet d'optimiser une fonction définie par l'utilisateur appelée fonction objective ou fonction d'adéquation.

Pour atteindre cet objectif, l'algorithme travaille en parallèle sur une population de points candidats appelés individus ou chromosomes (solution particulière) qu'on note  $x_n$ , chaque individu est constitué d'un ensemble d'éléments appelés gènes notés  $x_{nN}$  fig. (1.a), [14].

#### 3.4.1 Codage :

Dans l'algorithme génétique de base, tel qu'il a été fondé par Holland, les gènes sont formés de 1 et 0. Dans ce cas, chaque valeur réelle  $x_n$  (paramètres à optimiser) est codée par son équivalent en **bin**aire et l'individu obtenu est représenté par une chaîne codée de plusieurs gènes représentant une solution particulière pour la fonction objective fig. (1.b).

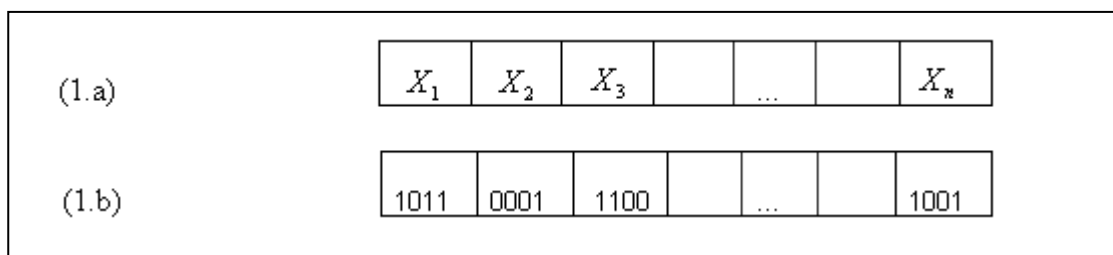
De nouvelles versions d'algorithme génétique sont apparues. Elles ne se basent plus sur le codage binaire mais elles travaillent directement sur les paramètres réels.

Ces versions, appelées algorithmes génétiques codés réels, offrent d'une part l'avantage d'**accélérer** la recherche et d'autre part de rendre plus **facile le couplage** avec d'autres méthodes d'optimisation. Ce codage est de plus en plus répandu. A chaque itération, appelée génération, est généré une nouvelle population avec, toujours, le même nombre d'individus au total ( $n=N$ ). Cette population est mieux adaptée à l'environnement tel qu'il est représenté par la fonction objective et les critères de l'optimisation (maximisation, minimisation, ...).

Plus on progresse dans les générations, plus les individus vont devoir tendre vers l'optimum de la fonction objective.

Le passage d'une génération à l'autre s'effectue en trois étapes, **évaluation** puis **sélection** et enfin **reproduction** avec des opérateurs de croisement puis de mutation.

Ces différentes étapes vont permettre, à la fin de la procédure, de trouver la combinaison optimale de gènes constituent l'individu le mieux adapté, [15].



**Fig.3.1** représentation d'un individu; codage réel (1.a); codage binaire (1.b)

### 3.4.2 Procédé d'implantation des AGs :

Pour utiliser l'AG, on doit disposer de six éléments :

- ❖ Un principe de codage de l'élément de population. Cette étape associe à chacun des points de l'espace considéré une structure de données. Elle se place après la phase de modélisation mathématique du problème traité. Les codages binaires ont été les premiers à être utilisés. Actuellement, on se sert de plus en plus de codages réels notamment pour l'optimisation des problèmes à variables réelles.

- ❖ Un mécanisme capable de générer une population initiale on homogène qui servira de base pou les générations futures. Ce choix conditionne la rapidité de la convergence vers l'optimum. Dans le cas où l'on ne connaît rien du problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche.
- ❖ Une fonction à optimiser (fonction d'évaluation ou fitness).
- ❖ Un mécanisme de sélection des individus candidats à l'évaluation. On utilise généralement la "roulette" du casino pour sélectionner les individus au hasard. Chaque individu occupe sur la roulette un secteur proportionnel à sa fonction d'évaluation: cela fait que le hasard est biaisé envers les éléments les plus justes (aptes) qui ont plus de chances d'être sélectionnés que les autres.
- ❖ Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existants. L'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace.
- ❖ Des paramètres de dimensionnement: taille de la population, critère d'arrêt, probabilité d'application des opérateurs génétiques, [13].

### 3.4.3 Paramètres de l'AG :

En réalité, il n'existe pas de paramétrage universel pour la quantification de ces paramètres de dimensionnement. Cependant, certaines valeurs largement utilisées pour résoudre concrètement des problèmes méritent d'être retenues :

- Taille de la population entre  $N=30$  et  $50$  individus;
- Taux de croisement entre  $P_c = p_c = 70\%$  et  $95\%$ ;
- Taux de mutation  $P_m = p_m = 0.5\%$  à  $1\%$ .

### 3.4.4 Ossature de l'algorithme :

p désigne la population

t désigne la génération

Début

t=0

Initialise p (t)

Evaluer p (t)

Tant que (condition de terminaison est fausse)

Début

t = t+1

Sélectionner p (t) de p (t-1)

Recombinaison p (t)

Evaluer p (t)

Fin

Fin

### 3.5 Evaluation :

L'algorithme génétique évalue une population d'individus qui forme la génération courante qu'on appelle ( $G_i$ ). Les individus les plus forts, au sens des critères de la fonction objective, auront théoriquement plus de descendants, que les autres individus, dans la génération qui suit donc ( $G_{i+1}$ ). Si l'on transpose dans un sens mathématique, l'algorithme génétique évalue la fonction d'adéquation que nous notons ( $f$ ) pour chaque individu ( $i$ ) de la population  $P(G_i)$ . Suivant les critères de l'optimisation, un classement entre l'individus sera effectué et les meilleurs qui répondent le mieux aux critères de la fonction objective auront une probabilité de reproduction (clonage) plus importante que les autres. C'est cette information qui guidera l'algorithme génétique vers les meilleurs individus, [13].

### 3.6 Sélection :

Suivant les probabilités de reproduction ( $P_s$ ) donnés aux individus. Au moment de l'évaluation. On fera la sélection stochastique des individus pour construire une population intermédiaire. Notée  $P'(G_i)$  toujours constituée de  $n$  individus.

Elle permet d'identifier les meilleurs individus d'une population, qui répondent au mieux à la fonction d'adéquation, et d'éliminer les mauvais on trouve dans la littérature un nombre important de principe de sélection plus ou moins adaptés aux problèmes qu'ils traitent. A titre illustratif, on ne s'intéressera qu'à la sélection à l'aide de la roue de loterie biaisé.

Pour sélectionner à l'aide de la roue de loterie biaisé, on fait tourner la roulette N fois (taille de la population) de la façon suivante : à chaque fois on génère aléatoirement un nombre  $r$  dans l'intervalle  $[0, 1]$ . Ensuite, on compare ces nombres aux probabilités  $q$ , si  $r_1 < q_1$ ,  $v_1$  Est sélectionné. Sinon  $v_1$  est sélectionné avec  $2 \leq j \leq N$  tel que  $q_{j-1} < r_1 < q_j$ , on procède de la même manière pour le reste des  $r_1 (i=2, N)$

La probabilité cumulative,  $q$ , pour chaque chromosome est donnée par:

$$q_j = p_1 + p_2 + \dots + p_j \quad (3.1)$$

La probabilité de sélection,  $p_s$  de chaque chromosome est exprimé par :

$$P_{sj} = feval(x_j) / F \quad (3.2)$$

$$F = \sum_{j=1}^N feval(x_j) \quad (3.3)$$

### 3.7 Reproduction avec les opérateurs de croisement et de mutation :

Une fois l'étape de sélection achevée, l'algorithme génétique poursuit sa recherche par l'application des opérateurs et de mutation l'opérateur de croisement joue le rôle de recombinaison et d'échange entre certains individus. Quant à l'opérateur de mutation, il modifie <<localement>> un individu en changeant sa composition, [15].

#### 3.7.1 Croisement :

Un pourcentage de la population intermédiaire sélectionnée  $P'(G_1)$  sera soumis au croisement ainsi, l'opérateur de croisement choisit au hasard, et avec une probabilité fixée, ( $p_c$ ) deux individus (deux parents) parmi cette population intermédiaire. Il construit alors deux enfants en faisant l'échange de certains gènes choisis aléatoirement d'un parent avec ceux de l'autre. Les deux enfants issus de ce croisement sont injectés dans la population que l'on note  $P'(G_1)$ . cette dernière sera alors constituée d'un pourcentage d'enfant issus du croisement. Le reste est issu directement de la population  $P'(G_1)$  sans aucune modification. Le nombre total d'individus dans  $P''(G_1)$  est toujours égal à n individus.

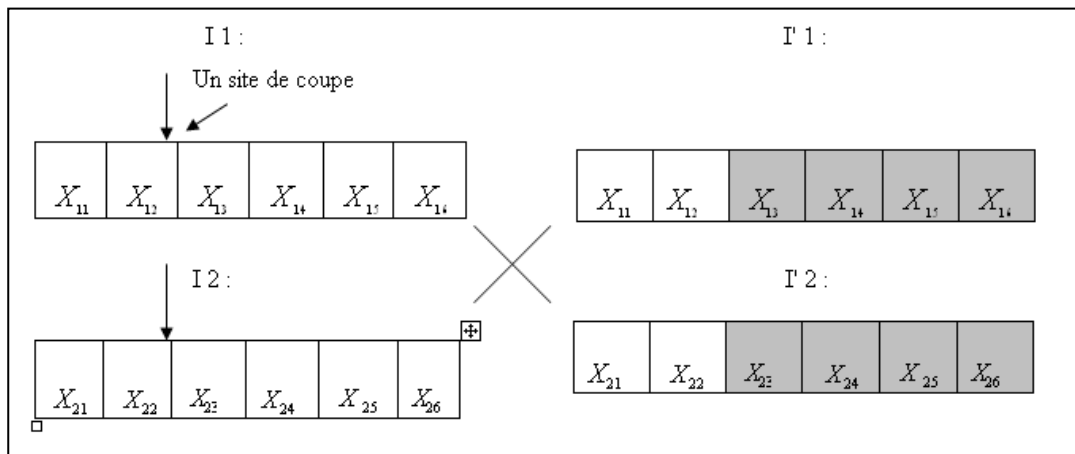
Il existe plusieurs types d'opérateurs de croisement, [15].

##### 3.7.1.1 Croisement un point du discret :

Pour ce type de croisement, on choisira au hasard "un site de coupe" entre les deux parents, fig. 3.2

Cela nous amène à prendre un nombre k (indice de site) entre 1 et (L-1) ou' L présente le nombre de gènes d'un individu. On obtient alors deux enfants en prenant les k premiers gènes du premier

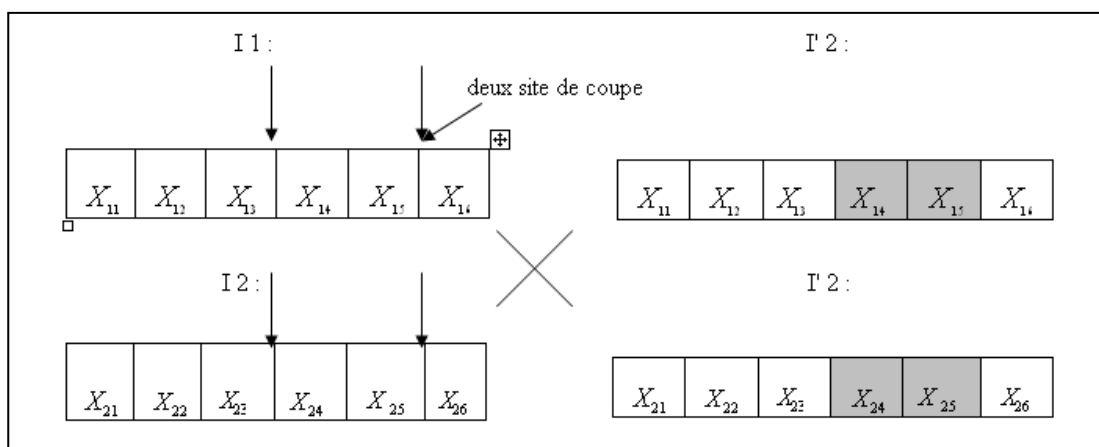
parent et les (L-K) derniers gènes du premier parent. Ces deux enfants sont comme Indiqué ci-dessus, injectés dans la population  $P'(G)$



**Fig. 3.2** Croisement un point (exemple d'un individu à six gènes)

### 3.7.1.2 Croisement a deux points :

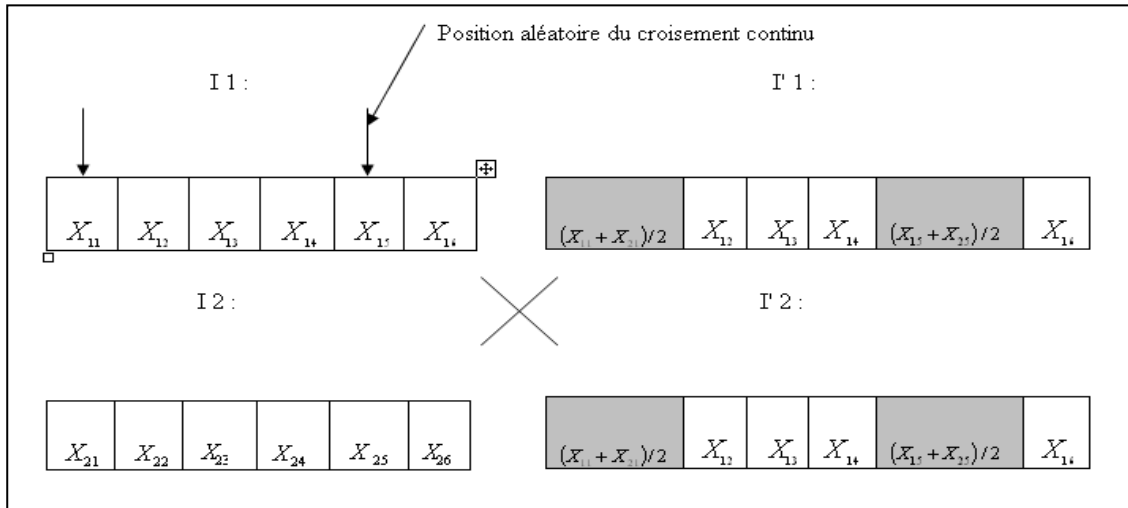
Le croisement a deux point est basé sur le même principe que le croisement un point la différence réside dans le fait que deux sites de coupe introduits au hasard entre les deux parents comme le montre la fig. 3.3 les gènes trouvés entre les deux sites de coupe sont échangés respectivement entre les deux individus (parents) pour former les deux enfants qui rejoindront la population  $P''(G_1)$



**Fig. 3.3** Croisement deux points

### 3.7.1.3 Croisement continu (ou uniforme) :

Ce croisement effectue une opération de type moyenne sur certains gènes des parents chaque gène a une chance sur deux d'être moyenné avec son homologue chez l'autre parent –voir fig. 3.4



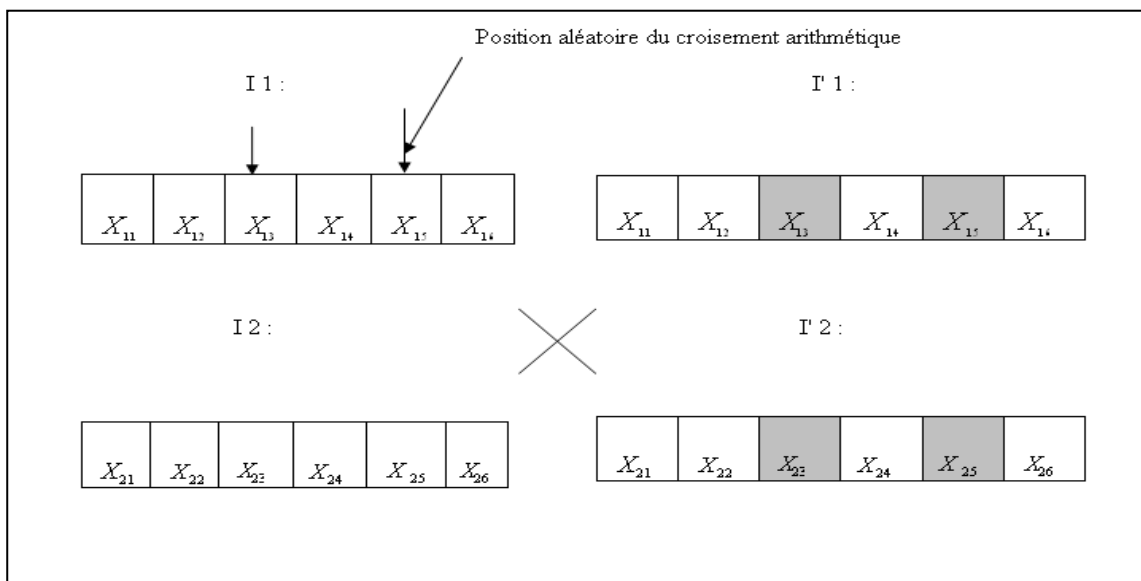
**Fig. 3.4** Croisement continu (ou uniforme)

### 3.7.1.4 Croisement arithmétique :

Ce type de croisement est proche du croisement continu. Comme précédemment, on choisit aléatoirement deux positions d'échange puis on effectue une moyenne arithmétique pondérée par un coefficient soit  $a$  pour la figure 5 les deux nouveaux gènes

$$y_{13} = ax_{13} + (1-a)x_{23} \text{ et } y_{23} = (1-a)x_{13} + ax_{23} \quad (3.4)$$

Qui remplacent  $y_{13}$  et  $y_{23}$  ils forment les enfants qui intègrent la population intermédiaire  $P''(G_1)$  la valeur de  $a$  est generee aléatoirement dans l'intervalle  $[0, 1]$ . On note que  $a = 0.5$  on retrouve le croisement continu, [2]



**Fig. 3.5** Croisement arithmétique

On peut aussi, appliquer une autre loi de croisement, les gènes qui se trouvent par exemple dans les sites de croisement  $x_{11}$  et  $x_{12}$  sont remplacés respectivement par :

$$x_{11} + a(x_{21} - x_{11}) \quad \text{et} \quad x_{21} + a(x_{11} - x_{21}) \quad (3.5)$$

Une fois l'étape de croisement est achevée, on applique la procédure de mutation, [2].

### 3.7.2 Mutation :

Chaque gène des individus de la population  $P'(G_1)$  peut subir une mutation avec une probabilité fixée notée  $P_m$ . L'opérateur de mutation agit donc en modifiant aléatoirement un ou plusieurs gènes d'un individu la valeur du gène muté est remplacée par une autre appartenant au même domaine de variation. On considère les individus choisis aléatoirement parmi les individus de la population  $P'(G_1)$  qui sont soumis à l'opérateur de mutation pour chacun de ces individus. On choisit également aléatoirement de gène qui va subir une modification.

Il est à noter que les gènes concernés par la mutation vont subir une modification importante durant, les premières générations. Par la suite le niveau des modifications ira en diminuant au fur et à mesure que la recherche évoluera vers la solution.

Il existe plusieurs types d'opérateur de mutation qui permettent d'assurer cette modification nous citons ici, [15].

#### 3.7.2.1 Mutation uniforme :

Pour chaque gène qui mute, on prend deux nombres  $s$  et  $r$ . Le premier " $s$ " peut prendre les valeurs  $\pm 1$ . Dans le cas où  $s$  est égale à 1, le changement est positif, dans l'autre cas le changement est négatif. Le second " $r$ " détermine l'amplitude du changement, c'est un nombre généré aléatoirement dans l'intervalle  $[0, 1]$  dans ces conditions, le gène  $X_j'$  qui remplace le gène qui mute  $X_j$  est calculé à partir de l'une des deux relations suivantes :

$$X_j' = X_j + (X_{\max} - X_j) \left( 1 - r^{a - \frac{G_r}{G_f}} \right) \quad (3.6)$$

Si  $s=1$

$$X_j' = X_j - (X_j - X_{\min}) \left( 1 - r^{a - \frac{G_r}{G_f}} \right) \quad (3.7)$$

Si  $s=-1$

Où :  $X_{\min}$  et  $X_{\max}$  désignent respectivement les limites inférieure et supérieure de la valeur du paramètre  $X_j$  et  $G_f \leq G_r$  représente la génération pour laquelle l'amplitude de la mutation

s'annule. A partir de cette génération les individus ne subissent plus de mutation, et l'exploration du reste de l'espace de recherche est assurée uniquement par l'action de croisement, [13].

### 3.7.2.2 Mutation non uniforme :

On remplace directement la valeur de gène, qui mute par exemple  $X_j$ , Par une autre valeur prise aléatoirement dans l'intervalle  $\left[ X_j^{\min} X_j^{\max} \right]$ .

Il existe un autre type de mutation non uniforme. Dans ce cas, la valeur mutée  $X'_j$  du gène  $X_j$  est donnée par la formule :

$$X'_j = \begin{cases} X_j + \Delta(t, y) \\ X_j - \Delta(t, y) \end{cases} \quad (3.8)$$

Avec 
$$\Delta(t, y) = yr \left( 1 - \frac{G_T}{G_F} \right)^b \quad (3.9)$$

Dans cette expression,  $y$  peut prendre les valeurs  $X_j^{\max} - X_j$  ou  $X_j - X_j^{\min}$  a condition que le résultat de l'opération ne sort pas l'intervalle  $\left[ X_j^{\min} X_j^{\max} \right]$ . Le paramètre  $r$  représente un nombre aléatoire avec  $0 < r < 1$ .  $b$  est un paramètre qui définit le degré de non uniformité.

La fonction  $\Delta(t, y)$  renvoie, d'une façon aléatoire, un nombre dans l'intervalle  $[0, y]$ . Elle permet de réaliser une recherche uniforme dans les premières génération, et plus pointue au fur et a mesure que l'on avance.

D'autres lois peuvent être utilisées pour calculer l'évolution des gènes en mutation. On peut remplacer le gène qui mute  $X_j$  et  $X'_j$  telle que  $X'_j$  est calculé par :

$$X'_j = X_j \pm \Delta X_j \quad (3.10)$$

Avec : 
$$\Delta X_j = (X_{\max} - X_{\min}) 2^{-kr} \quad (3.11)$$

Le quantité  $k$  est une constante souvent prise égale a 16. Après la mutation, les individus constitueront la nouvelle population  $P(G_{t+1})$  de  $n$  individus qui donne naissance a la nouvelle génération. Le cycle continu : évaluation, sélection, reproduction (croisement et mutation), évaluation, etc. Jusqu'a la dernière génération fixée.

Il y a donc quatre paramètres de base qui doivent être fixes pour assurer le fonctionnement d'un AG : le nombre d'individus dans la population  $n$ , la génération maximale  $G_T$ , les taux de croisement  $P_c$  et de mutation  $P_m$ .

Trouver de bonnes valeurs à ces paramètres est un problème parfois délicat. La valeur de  $n$  qui désigne le nombre d'individus de la population à optimiser (en particulier le nombre de gènes de chaque individu). En pratique, on arrive à une solution acceptable en prenant pour les valeurs de  $P_c$  et  $P_m$  respectivement 0.7 et 0.01, [13].

### 3.8 Organigramme de la procédure AG :

Nous résumerons, par l'organigramme de la fig. 3.6 l'ensemble des étapes permettant d'effectuer une optimisation avec l'algorithme génétique.

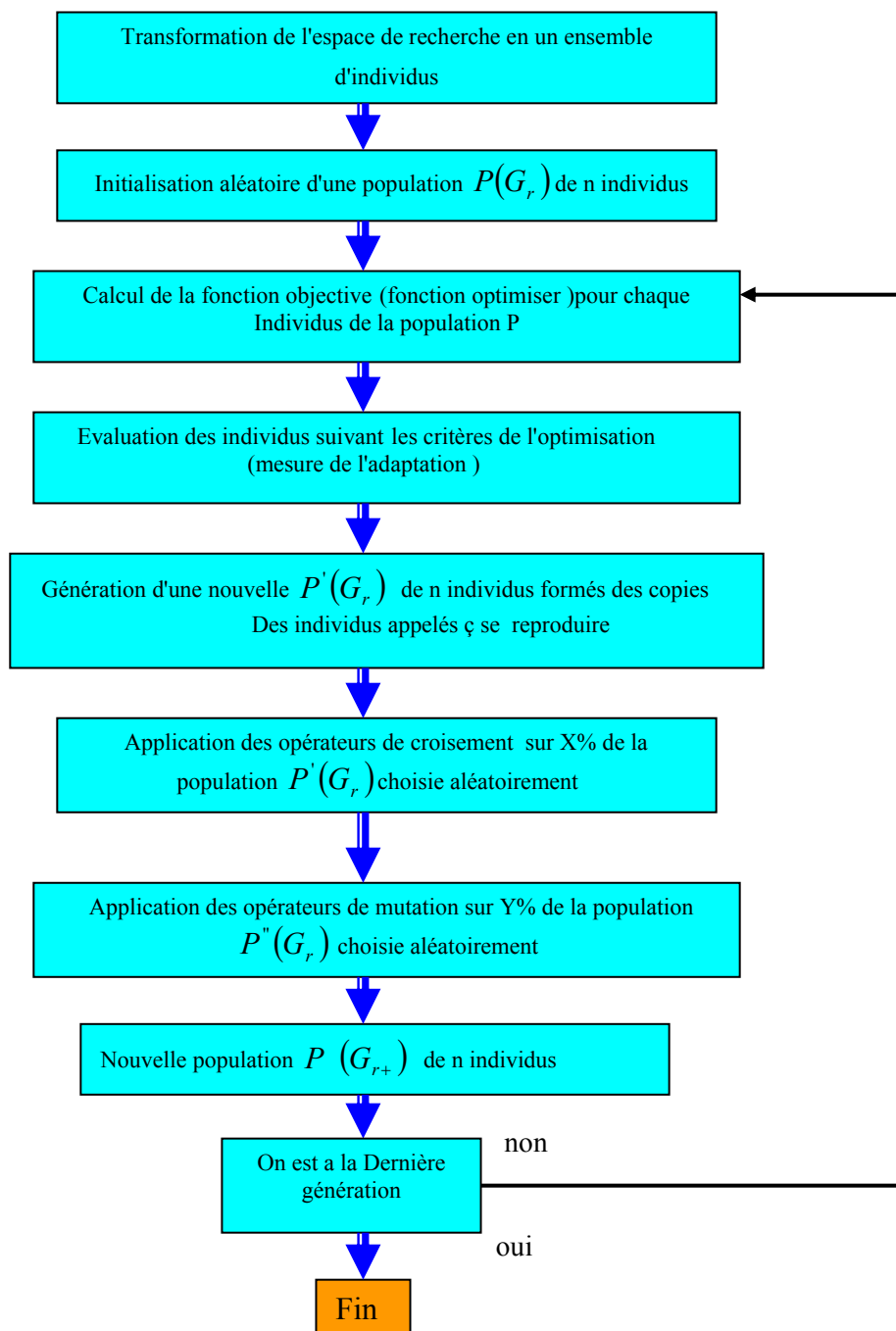


Fig. 3.6 Les différentes étapes des algorithmes génétiques

### 3.9 Application d'optimisation par AGs :

Dans le but de tester l'efficacité de l'algorithme génétique, développé sur la base des outils décrits précédemment, nous proposerons une procédure de maximisation par l'AGs et considérons quelques exemples d'application :

#### 3.9.1 Procédure de maximisation par algorithmes génétiques :

Pour chercher le maximum d'une fonction simple  $F(x)$  dans l'intervalle  $[a, b]$  avec une précision de  $n$  chiffres significatifs, on procédera la manière suivante :

- L'intervalle  $[a, b]$  est subdivisé en  $(b-a) 10^n$  petits intervalles qui représenteront chacun un chromosome
- Chaque chromosome est codé en binaire à l'aide de  $K$  bit, avec  $K$  vérifiant l'inéquation suivante :

$$2^{(K-1)} < (b-a)10^n \cdot 2^K \quad (3.12)$$

- La valeur décimale,  $X_j'$  correspondant au code binaire de chaque chromosome binaire  $(a_{K-1} \dots a_1 a_0)$  est calculé par :

$$X_j' = \sum_{i=0}^{K-1} a_i 2^i \quad (3.13)$$

- Le nombre réel,  $x$ , correspondant à la valeur binaire est déterminé par :

$$X_j = a + X_j' \cdot (b-a) / (2^K - 1) \quad (3.14)$$

- Pour chaque génération les calculs suivants sont effectués :
  - Calcul de la fonction d'évaluation  $feval(x_j)$  pour chaque chromosome  $v_j$ .
  - Calcul de l'évaluation totale,  $F$ , de la population constituée de  $n$  individus :

$$F = \sum_{j=1}^N feval(X_j) \quad (3.15)$$

- Calcul de la probabilité de la sélection,  $P_s$  de chaque chromosome :

$$P_{s_j} = feval(X_j) / F \quad (3.16)$$

- Calcul de probabilité cumulative,  $q$ , pour chaque chromosome :

$$q_j = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_j \quad (3.17)$$

- Pour sélectionner à l'aide de la roue de loterie biaisée, on fait tourner la roulette  $N$  (fois la taille de la population) de la façon suivante: à chaque fois on génère aléatoirement un nombre  $r$  dans l'intervalle  $[0, 1]$ . ensuite on compare ce nombre aux probabilités  $q_j$ . Si  $r_1 < q_1$ ,  $V_1$  est sélectionné, sinon  $V_j$  est sélectionné avec  $2 \leq j \leq N$  tel que  $q_{j-1} < r_1 < q_j$  on procède de la même manière pour le reste  $r_i$  ( $i = 2, N$ )

- Pour chaque chromosome de la nouvelle génération, on génère, au hasard  $N$  nombre  $r$  dans  $[0, 1]$  et on compare à la probabilité de croisement  $P_c$ . Si  $r_1 < P_c$ . Le  $i^{\text{ème}}$  chromosome est sélectionné pour le croisement, sinon il n'est pas
- Croisement des chromosome ainsi sélectionnés deux à deux, Si le nombre de ces chromosomes est impair, on peut élaguer un, ou bien reprendre un autre.
- On mute un bite de l'ensemble des gènes différents chromosomes si le nombre génère arbitrairement  $r$  probabilité de mutation  $P_m$ .
- Dans notre cas, après chaque génération, le nombre d'individus est incrémenté progressivement afin d'introduire une assez grande diversification dans la population, [14].

### 3.9.2 Exemple d'application :

Cette exemple, concerne une fonction mathématique a une variable dont on cherche le maximum Il est traite d'une manière pédagogique afin ce de faciliter la compréhension de l'implémentation de l'approche génétique .

Cherchons le maximum de  $f(x) = -x^2 + 6x$  dans l'intervalle  $[2, 4]$  avec une précision de  $1/10$  analytiquement, on voit que  $f'(x) = -2x + 6$  que  $f''(x) = -2$  et que le maximum correspond a  $x = 3$  et  $f(x) = 9$

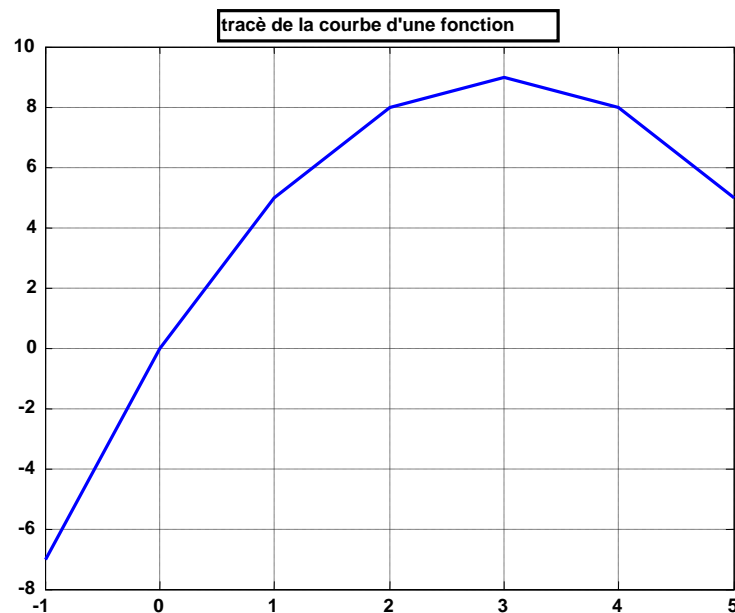


Fig. 3.7 Allure de la fonction à optimiser

**a) Première étape :**

**✚ la genèse de la population et les paramètres :**

Pour la détermination du maximum d'une fonction, nous allons prendre les paramètres suivants:

- ✓ La longueur de l'intervalle est  $4-2 = 2$  ;
- ✓ Chaque unité doit être subdivisée en  $10^n$  (précision souhaitée,  $n=1$ ) ;
- ✓ Donc, l'intervalle est subdivisée en  $2 * 10 = 20$  petits intervalles; en  $2*10 = 20$  petits intervalles
- ✓ Le nombre de bits requis pour représenter tous les réels considérés dans l'intervalle est  $k$  tel que :  $2^{k-1} \leq 20 \leq 2^k$   $k=5$  :
- ✓ la probabilité de croisement  $P_c = 0.75$
- ✓ la probabilité de mutation  $P_m = 0.01$ .

On va modélisé ce problème comme suit :

La taille de la population est de 4 individus (chromosome), chaque individu codé sur cinq bits (gènes). Choisis aléatoirement la génération initiale

V1=01100

V2=00011

V3=11011

V4=10100

**b) Deuxième étape :**

**✚ l'évaluation :**

On commence de calculer les valeur de ou le chromosome V représente le réel x pour tout les chromosomes  $V_i$  pour  $i = 1, 2, 3, 4$ . On applique la formule :  $X_i = a + X_i' * (b-a)/(2^K - 1)$

On trouve:

$$X1' = 12 \quad x1 = 2 + 12 * (2) / 31 = 2.77$$

$$X2' = 3 \quad x2 = 2 + 3 * (2) / 31 = 2.19$$

$$X3' = 27 \quad x3 = 2 + 27 * (2) / 31 = 3.74$$

$$X4' = 20 \quad x4 = 2 + 20 * (2) / 31 = 3.29$$

Par conséquent, leurs fonctions d'évaluation respectives sont :

$$\text{Eval (V1)} = f(x1) = 8.9490$$


$$\text{Eval (V2)} = f(x2) = 8.3496$$

$$\text{Eval (V3)} = f(x3) = 8.4495$$

$$\text{Eval (V4)} = f(x4) = 8.9157$$

La grande évaluation 8.9490 et la valeur moyenne **8.6660**

**c) Troisième étape :**

 **La sélection :**

La sélection se fait par la méthode de la sélection proportionnelle. Pour cela, il faut construire une roulette de sélection.

La somme des évaluations est donnant par la relation suivant :

$$F = \sum_1^4 f(x_i) = 34.6638$$

Puis calculons les probabilités de sélection de chaque chromosome, on obtient :

$$P1 = f(x1) / F = 0.2582 \quad Q1 = 0.2582$$

$$P2 = f(x2) / F = 0.2409 \quad Q2 = 0.4991$$

$$P3 = f(x3) / F = 0.2438 \quad Q3 = 0.7429$$

$$P4 = f(x4) / F = 0.2572 \quad Q4 = 1.0001$$

On fait tourner 4 fois la roulette pour générer des nombres r dans [0 1], on obtient :

**0.512 0.71 0.216 0.773**

**r= 0.512 Q 3 > 0.512 V3 est sélectionné**

**r= 0.710 Q 3 > 0.71 V3 est sélectionné**

**r= 0.216 Q 1 > 0.216 V1 est sélectionné**

**r= 0.773 Q 4 > 0.773 V4 est sélectionné**

La première génération devient

**V1' = v3 = 11011**

**V2' = v3 = 11011**

**V3' = v1 = 01100**

**V4' = v4 = 10100**

**d) Quatrième étape :**

 **Le croisement :**

Nous pouvons désormais appliquer l'opération de croisement aux individus de la nouvelle population (les vecteurs Vi). La probabilité de croisement est de  $P_c = 0.75$ . Assumons qu'aléatoirement, on procède au croisement à partir de la deuxième position, on fait tourner la roulette pour générer des nombres r dans [0 1]. Si  $r < 0.75$ , le chromosome est sélectionné pour le croisement.

On obtient :

**0.82 0.52 0.17 0.35**

Alors V2, V3, V4 sont sélectionnés. Comme le nombre est impair, on laisse tomber le dernier.  
Cela donne pour le croisement :

**V2' 11011 11100**

**V3' 01100 01011**

La nouvelle population est donc :

**V1'' = 11011**

**V2'' = 11100**

**V3'' = 01011**

**V4'' = 10100**

**e) Cinquième phase :**

**✚ La mutation :**

Il y a  $4 \times 5 = 20$  bits, On tourne la roulette 20 fois pour générer  $r$  dans  $[0, 1]$ , Si  $r < 0.01$  ( $P_m$ ), on mute le bit de ce rang.

On obtient :

**0.6833 0.2126 0.8392 0.6288 0.1338 0.2071 0.6072 0.6299 0.3705 0.5751 0.4514 0.0439 0.0272  
0.3127 0.0129 0.3840 0.6831 0.0028 0.0353 0.6124**

Seulement, au 18<sup>ème</sup> tour, on obtient  $r = 0.008$ , on mute, alors le 18<sup>ème</sup> bit qui correspond au 3<sup>ème</sup> bit du 4<sup>ème</sup> vecteur.

Finalement, la première génération devient :

**V1'' = 10011**

**V2'' = 11100**

**V3'' = 01011**

**V4'' = 10100**

En évaluant la première génération, on obtient :

**V1 = 10011**

**V2 = 11100**

**V3 = 01011**

**V4 = 10000**

**X1' = 27       $x_1 = 2 + 27 * (2) / 31 = 3.7419$**

**X2' = 28       $x_2 = 2 + 28 * (2) / 31 = 3.8065$**

**X3' = 11       $x_3 = 2 + 11 * (2) / 31 = 2.7097$**

**X4' = 16       $x_4 = 2 + 16 * (2) / 31 = 3.0323$**

Par conséquent, leurs fonctions d'évaluation respectives sont :

$$\text{Eval (V1)} = f(x1) = 8.4495$$

$$\text{Eval (V2)} = f(x2) = 8.3496$$

$$\text{Eval (V3)} = f(x3) = 8.9157$$

$$\text{Eval (V4)} = f(x4) = 8.9990$$

Evaluation totale égale **34.7138**, la plus grande valeur **8.9990**, la valeur moyenne égale **8.6784**.

On vient de terminer une itération de la boucle 'tant que'. Et la solution délivrée par cette génération est **X4=3.0323** qui correspondre à **f(x4) = 8.9990**

Si ce résultat n'est satisfaisant, on forme une autre génération à partir de celle-ci et en refaisant la boucle "tant que" (on applique les opérateurs de sélection, croisement et de mutation). ensuite, on forme autant de génération qu'il faut jusqu'à la satisfaction du critère d'arrêt.

### **3.10 Conclusion :**

Le but de ce chapitre est de présenter le principe de la méthode d'optimisation base sur L'AG, son fondement ainsi que les différentes étapes nécessaires a son développement, finalement une application simple a été donné afin de faciliter la compréhension de ces dernières.

Le principe des AGS repose sur une analogie entre un individu dans une population et la solution d'un problème parmi l'ensemble de solutions potentielles : les individus (solutions) sont codés sous forme de chaînes de caractères, généralement binaires. L'algorithme fait évaluer une population d'individus à l'aide de divers opérateurs (sélection, croisement et mutation). Cependant, pour mettre en oeuvre avec succès un AG il faut choisir avec soin les trois paramètres suivants:

- ❖ la probabilité de croisement  $P_c$ ;
- ❖ la probabilité de mutation  $P_m$ ;
- ❖ la taille de la population  $N$ .

**Chapitre quatre**  
**Moteur a induction a haut**  
**rendement**

### **3.1 Introduction**

Depuis plusieurs années la tendance dans la conception des machines électriques porte d'une part sur l'amélioration des performances et d'autre part à la minimisation de la puissance massique et du prix de revient. En effet, cela repose particulièrement sur le rendement de ces machines. Avec l'augmentation continue du coût de l'énergie et de la pression causée par le souci de la protection de l'environnement, les fabricants des machines électriques ainsi que les consommateurs s'intéressent à la réduction de la consommation d'énergie des systèmes électriques. Ce qui conduit au lancement d'importants travaux à travers le monde, particulièrement pour l'amélioration du rendement des machines asynchrones. Cela est principalement due à la place qu'elles occupent, [13].

Dans les dernières décennies, la nouvelle génération des moteurs sont proposées sur le marché mondial et connues pendant que les moteurs de rendement élevé (Hi-E-M) ou comme moteurs efficaces d'énergie (E-E-Ms). Ces nouveaux types de moteurs sont plus chers que les classiques, dans la gamme de 20-40%, de plus grand à la gamme inférieure de puissance respectivement, la plupart des acheteurs de moteur sont intéressés par les moteurs les meilleur marché, au lieu de considérer leurs caractéristiques et exécutions. L'utilisation de cette nouvelle génération des moteurs électriques et leur dépendance d'exploitation annuel mènent, en particulier, pour des investissements lourds, à un amortissement plus rapide dans certains cas moins de deux ans, [14].

Dans ce chapitre, on présente en premier lieu le moteur asynchrone à haut rendement et leur caractéristique, la procédure d'économies d'énergie, en suite on situera les méthodes d'évaluation, les normes les plus usagées pour déterminer le rendement après on terminera par les possibilités de l'augmenter le rendement

### 3.2 Moteurs à induction à haut rendement (MI-HRs) :

En général, l'efficacité des vieux moteurs électriques est beaucoup plus basse (tout comme le facteur de puissance) que celle de la nouvelle génération des moteurs à haut rendement (HR). Les moteurs HR ont des rendements supérieurs à 93 p. 100 (par rapport à la puissance du moteur; plus elle est élevée, plus le moteur est efficace). Le remplacement sommaire des vieux moteurs par des modèles HR est souvent difficile à justifier, à moins qu'ils ne fonctionnent près de 24 heures sur 24, et que les économies d'électricité offrent un bon rendement du capital investi. Dès que les moteurs doivent être remplacés ou envoyés au rebobinage, il serait avisé de choisir de nouveaux moteurs de type HR. Produisez une justification de coût basée sur l'écart de coût marginal du moteur, Le Fig. 3.4 donne des valeurs typiques du rendement et du facteur de puissance pour des moteurs de diverses puissances de construction classique ainsi que pour des moteurs à haut Rendement, [15].

charge		100%		75%		50%	
hp	type	$\eta$	F <sub>P</sub>	$\eta$	F <sub>P</sub>	$\eta$	F <sub>P</sub>
0.75	HR	84.0	80.5	84.0	74.0	81.5	62.0
0.75	CL	72.0	78.0	72.0	70.0	68.0	58.0
7.5	HR	90.2	88.0	90.2	85.0	90.2	77.0
7.5	CL	84.0	85.5	84.0	80.5	81.5	75.0
37	HR	92.8	84.5	93.0	81.0	91.7	73.0
37	CL	91.7	84.0	91.7	81.0	90.2	71.5
75	HR	93.5	91.5	94.0	91.0	93.8	87.0
75	CL	91.7	83.5	91.7	80.5	90.2	73.0
150	HR	94.8	90.5	94.6	88.5	94.3	83.0
150	CL	89.0	88.5	91.7	88.5	89.5	80.0

**Fig. 4.1** Comparaison entre certains moteurs à induction à haut rendement (MI-HRs) et de type classique équivalents (MI-CLs)

On remarque pour ces derniers une diminution important des pertes et une amélioration sensible du facteur de puissance. Pour obtenir ces résultats, il a fallu réviser les critères de

conception. En premier lieu, on utilise une plus grande quantité d'aciers de meilleure qualité pour construire le circuit magnétique. Ces aciers ont des pertes spécifiques qui s'élèvent à seulement 3,3W/kg au lieu de 6,6W/kg pour l'acier de qualité usuelle. De plus on a réduit la densité de flux et accru l'isolation entre les tôles de façon à réduire à la fois les pertes par Hystérésis et les pertes dues aux courants de Foucault. Le nombre d'encoches ainsi que leur forme ont été optimisés. On utilise aussi des conducteurs de 35 à 40% plus gros afin de réduire les pertes dues à l'effet joule. On a toutefois maintenu deux critères important : les dimensions des carcasses et les caractéristiques des moteurs, qui conservent le comportement des moteurs à couple normal et à faible courant de démarrage. De cette manière, ces nouveaux moteurs sont interchangeables avec les moteurs classiques de même type, [15].

### 3.3 Rendement des moteurs à induction:

Pour les systèmes de puissance électrique le rendement est d'une très grande importance, car cela a un impact direct sur le fonctionnement de la machine et une incidence sur l'aspect économique de la consommation énergétique. Pour déterminer le rendement des moteurs électriques, il existe plusieurs méthodes, parmi ces méthodes on trouve: méthode de la plaque signalétique, méthode de glissement, méthode de courant, méthode statistique, méthode du circuit équivalent, méthode des pertes isolées, méthode de couple d'entrefer. Et on peut les mesurer directement ou indirectement. Toutes ces méthodes déterminent le rendement selon la définition donnée par l'équation (3.1).

$$\eta = \frac{P_{\text{mécanique}}}{P_{\text{électrique}}} = \frac{P_{\text{mécanique}}}{P_{\text{électrique}} + \sum \text{pertes}} \quad (3.1)$$

Il y a trois types principales de mesures pour déterminer le rendement:

- ✚ Mesure directe de la puissance électrique d'entrée et mécanique de sortie ;
- ✚ Mesure directe des pertes totales et de la puissance d'entrée ;
- ✚ Mesure des différents composants de perte et de la puissance d'entrée.

### 3.4 Caractéristiques des moteurs à haut rendement:

Les moteurs transforment l'électricité en énergie mécanique. Le rendement d'un moteur s'obtient du ratio entre la puissance de sortie mécanique et l'énergie électrique consommée. Autrement dit, le rendement du moteur représente le pourcentage d'énergie absorbée convertie en travail utile.

La valeur nominale du moteur indiquée sur la plaque signalétique est fonction du nombre de chevaux puissance ou horse-power (HP) produits à partir d'un fonctionnement en continu à plein régime (ou à pleine charge). La quantité d'énergie requise pour générer la puissance nominale

varie d'un moteur à l'autre, les plus performants nécessitant moins de puissance d'entrée pour donner le même rendement que les modèles moins efficaces.

Les moteurs à haut rendement ont la même construction que les moteurs classiques mais il sont généralement les plus utilisés dans l'industrie. On les distingue par:

- + L'acier mince et de bonne qualité pour le stator;
- + Une augmentation de la quantité de cuivre dans les enroulements;
- + Une minimisation de l'épaisseur de l'entrefer entre le stator et le rotor;
- + Une réduction des pertes de ventilation;
- + Une grande longueur;
- + Une augmentation de la taille de la carcasse.

Pour un coût supplémentaire de 20 à 30%, les moteurs efficaces (EEMs), aussi appelés moteurs à haut rendement, ont un rendement meilleur de 2 à 6%, ce qui représente des économies d'énergie significatives

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

- + La fiabilité augmente;
- + Les coûts de maintenance et d'arrêt sont réduits;
- + La tolérance aux stress thermiques s'accroît;
- + La capacité de résistance aux surcharges s'améliore, [16].

La résistance aux conditions de fonctionnement anormales – sous et sur tension, aux phases non équilibrées, aux variations de la forme de la puissance et du courant ( par exemple les harmoniques),etc. s'améliore:

- + Le facteur de puissance s'améliore;
- + Le bruit est réduit.

### **3.5 Différentes normes de mesures du rendement:**

De nos jours, avec l'emphase croissante sur la conservation d'énergie, les valeurs de rendement sont devenues très importantes et même dominantes dans l'industrie.

Les valeurs de rendement indiquées par les fabricants sont mesurées ou calculées selon certaines normes. Dans le monde entier, il existe plusieurs normes pour examiner les machines électriques.

Parmi ces normes en trouve :

- + La norme américaine NEMA MG1 (IEEE 112b/1991) ;
- + La norme japonaise de JEC-37 ;
- + La norme européenne IEC 60034-2/1972 International UK/germany/france/aust.). Actuellement, une nouvelle norme du IEC(IEC 61972), est en cours de développement;

- ✚ La norme australienne 1359 (2000) ;
- ✚ ABNT NBR 5383/1982(norme brésilienne) ;
- ✚ La norme CSA C-390/1993 de l'association canadienne.

Pour les moteurs à inductions, les trois normes les plus importantes sont : la norme américaine IEEE 112b/1991, le Japonais JEC-37 et le IEC 60034 -2 européens. La différence entre ces normes et la manière de traiter les pertes additionnelles ou les pertes parasites de charge, [17].

### **3.6 Méthodes de mesures :**

Les méthodes de mesures sont décrites dans les normes IEEE 112/1991, IEC 60034-2/1972, CSA C-390/1993 et ABNT NBR 5383/1982. De ces quatre normes mentionnées ci-dessus, cinq groupes de méthodes pour déterminer le rendement de moteur peuvent être obtenus, [18].

**Méthode 1 :** dans laquelle la puissance d'entrée et de sortie sont directement mesurées, selon les normes d'IEEE, IEC 60034-2 et de ABNT NBR. La mesure de puissance d'entrée et de sortie (l'essai c'est fait après l'élévation de la température de charge). La norme d'IEEE demande une correction des pertes de stator à une température indiquée avant de déterminer le rendement de moteur.

**Méthode 2:** dans laquelle les puissances d'entrée et de sortie sont mesurés avec la séparation des pertes et la mesure indirecte des pertes parasites de charge, selon les normes d'IEEE et de CSA C-390. Les pertes parasites de charge sont définies comme toutes les pertes sans la somme des pertes conventionnelles (pertes électriques, pertes magnétiques et pertes mécaniques). Les pertes parasites de charge sont obtenues à partir des analyses d'une régression linéaire pour réduire l'effet des erreurs aléatoires dans les mesures d'essai. La méthode 2 peut fournir des résultats différents de la méthode 1, principalement en raison des ajustements des pertes parasites de charge dans lesquels toutes les erreurs de mesure d'essai sont incluses.

**Méthode 3:** Méthode avec les machines reproduites, comme vu dans les normes d'IEEE, IEC 60034-2 et de ABNT NBR. Quand deux machines identiques sont couplées ensemble et alimentées à partir de deux sources d'énergie séparées. Le courant électrique dans et hors des deux machines est mesuré et la différence sont les pertes combinée des deux machines.

**Méthode 4:** Méthode avec la mesure directe des pertes parasites de charge et de la séparation des pertes, selon des normes d'IEEE, IEC 60034-2, CSA C-390 et ABNT NBR. Dans cette méthode, le rendement est indirectement calculé par la détermination des tous les pertes (pertes électriques, pertes magnétiques et pertes mécaniques et les pertes parasites de charge). Aux normes d'IEEE et de CSA C-390 les pertes parasites de charge sont obtenues directement à partir des essais spécifiques.

**Méthode 5:** Méthode dans laquelle le circuit équivalent est déterminé, selon des normes d'IEEE, CSA C-390 et ABNT NBR. Le rendement de moteur est calculé à partir des paramètres du circuit équivalent. Dans cette méthode, il est très important de prendre l'impédance de rotor à basse fréquence. La précision d'impédance de rotor affectera considérablement les caractéristiques sous la charge. En calculant les paramètres, les réactances sont corrigées à la fréquence et les résistances sont corrigées à une température indiquée, [18].

### **3.7 l'influence de quelques facteurs sur le rendement des moteur électriques:**

Il y a un nombre de facteurs relatifs au fonctionnement et à l'entretien du moteur qui ont un grand effet sur son rendement. Dans le but de maintenir et d'améliorer le rendement de fonctionnement du moteur, plusieurs facteurs peuvent être utilisés: le rendement et les techniques de commande de moteur, la qualité de système d'alimentation, le réseau de distribution, la taille des moteurs électriques, les moyens mécaniques de transmission, les problèmes d'entretien, cycles de gestion de charge...etc., [14].

#### **3.7.1 Qualité d'alimentation d'énergie**

Moteurs électriques, et en particulier moteur à induction, sont conçus pour fonctionner avec une exécution optimale, une fois alimentés par des formes d'ondes sinusoïdales triphasés symétriques avec la valeur de tension nominale. Les déviations de ces conditions idéales peuvent causer la détérioration significative de rendement et de la vie de moteur, [14].

#### **3.7.2 Charge du moteur**

La charge du moteur peut avoir aussi un effet significatif sur son rendement. Un moteur chargé à plus de 50% a un rendement relativement stable. A charge plus faible, le rendement diminue considérablement. Les faibles rendements sont due aux charges inadaptées ou à un fonctionnement à vide des moteurs ; de telles conditions doivent être évitées, [14].

#### **3.7.3 Plage d'utilisation des moteurs**

D'une manière générale le rendement ( $\eta$ ) des moteurs électriques prend une valeur maximal pour :  $0.6 I_n \leq I_n \leq 1.0 I_n$ , car dans cette plage on considère, que le rapport des pertes à la puissance consommée est minimal. En dehors de cette plage, les pertes devenant beaucoup plus prépondérantes, entraîne la croissance de ce rapport donc une réduction du rendement ( $\eta$ ), [14].

#### **3.7.4 Maintenance du moteur**

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

optimal. L'inspectant pour aboutir à cette fin. La mesure périodique de la tension et du courant du moteur est fortement recommandée, [14].

### 3.8 Travail réalisé :

La combinaison d'une conception assistée par ordinateur avec artificielle intelligente des techniques d'optimisation constitue un outil important, en particulier sur l'ingénierie des processus de conception des performances élevées et des systèmes coûteux. Dans le domaine des machines électriques, en raison de la complexité des fonctions décrivant leurs performances, le problème d'optimisation de ces machines est une multi variable limitées problème non linéaire. Pour optimiser l'efficacité des machines à induction, calculé un processus de conception associée à un algorithme génétique ont été mis au point la figure 1., Selon

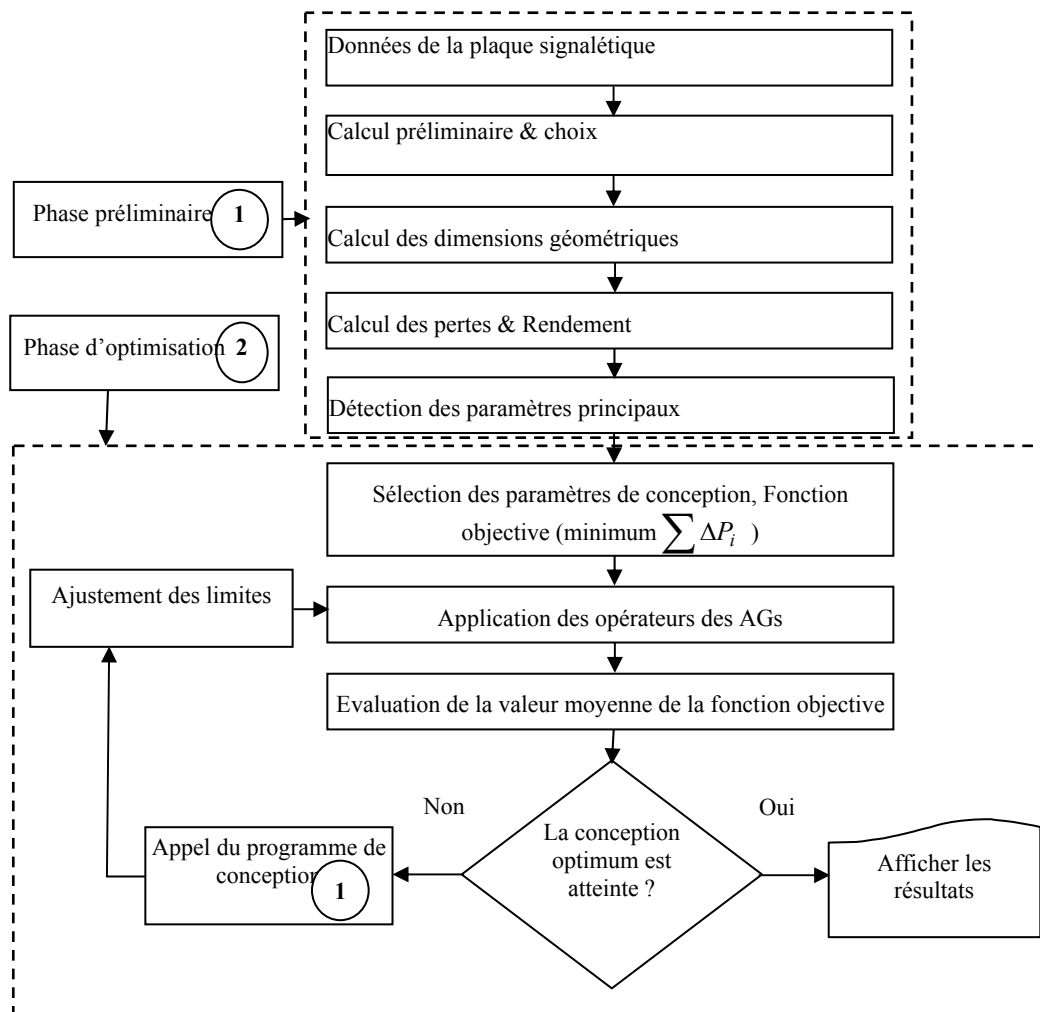


Figure 1. Organigramme de la méthode d'optimisation proposée

La mise en œuvre de cette méthode conduit à un développement d'un programme de conception de machines à induction, qui comprend magnétiques, électriques et mécaniques calculs. Parmi les valeurs obtenues.

### 3.9 Pour une machine a 2,2 kW :

Le banc d'essai étudié concerne une machine à cage type ELPROM, A0-112 M-2B3T-11 dont les caractéristiques sont données sur le **Tableau. 1**.

$P_u$	Puissance Utile	2.2	kW
$V_s$	Tension Nominale	220	V
$p$	Nombre de paires de pôles	2	---
$m_1$	Nombre de Phases de la Machine	3	---
$f_s$	Fréquence	50	Hz
$\cos \varphi$	Facteur de puissance	0.82	---
$\eta$	Rendement	0.80	---
$I_s$	Courant Absorbé	5.3	
$n_r$	Vitesse	1400	tr/min

**Tableau. 1** Plaque signalétique

Certains des résultats obtenus de la machine conçue paramètres sont présentés dans le tableau 2.

Abrév.	Paramètres	Valeurs	Abrév.	Paramètres	Valeurs
$D (mm)$	Diamètre d'alésage	99	$R_s (\Omega)$	Résistance - phase enroulement .stator	2.962
$MW (kg)$	Poids de la machine	21.253	$I_o (A)$	Courant à vide	3.5
$M (H)$	Inductance mutuelle stator - rotor	0.11	$P_{ft+vt} (W)$	Pertes frottement /ventilation	15.40
$R'_r (\Omega)$	Résistance - rotor ramenée au stator	2.258	$Z_{rt} (mm)$	Largeur de la dent rotorique	3.509
$l'_{\sigma r} (H)$	Inductance de fuite rotor ramenée au stator	0.01078	$h_{rt} (mm)$	Hauteur de la dent rotorique	9.0
$l_{\sigma s} (H)$	Inductance de fuite stator	0.01086	$\delta (mm)$	Epaisseur de l'entrefer	0.33
$D_{er} (mm)$	Diamètre extérieur rotorique	98.3	$B_{hj2} (T)$	Induction - culasse Rotor	1.32
$B_{hj1} (T)$	Induction - culasse statorique	1.30	$B_{t2} (T)$	Induction - tête dent rotor	2.07
$B_{r1} (T)$	Induction -tête dent stator	1.74	Ratio	Nombre encoches / Nombre de bars	36/48
$B_{\delta} (T)$	Induction dans l'entrefer	0.85	$\eta$	Rendement calculé	0.8008
$\cos \varphi$	Facteur de puissance	0.813	$T_{dem} / T_n$	-----	2.014

**Tableau. 2** Résultats du programme de la conception

Les résultats, qui sont résumées dans le tableau 2, permettent de définir l'espace de recherche pour l'algorithme génétique. Par conséquent, plus important encore, il effectue une tâche intéressante dans un court laps de temps et permettre d'éviter une lourde dépenses résultant de la mise en œuvre de non-optimisé machine

### 3.9.1 Variables de conception et leurs limites

La variable tableau 2 définit l'espace de recherche pour le moteur d'optimisation est indiqué dans le tableau 3.

Abrév.	Paramètres	Unité	Espace de recherche
$D$	Diamètre d'alésage	$mm$	$99 \leq D \leq 100$
$\delta$	Epaisseur de l'entrefer	$mm$	$0.3 \leq \delta \leq 0.4$
Rapport $h_{tr}/Z_{rt}$	Rapport géométrique-rotor	-----	$2.5 \leq h_{tr}/Z_{rt} \leq 2.8$
$B_{t1}$	Induction -tête dent stator	$T$	$1 \leq B_{t1} \leq 2.2$
$B_{t2}$	Induction - tête dent rotor	$T$	$1 \leq B_{t2} \leq 2.2$
$MW$	Poids de la machine	kG	$21 \leq M \leq 23$

**Tableau. 3** Limites d'intervalle de recherche

### 3.9.2 Résultats d'Optimisation et discussion

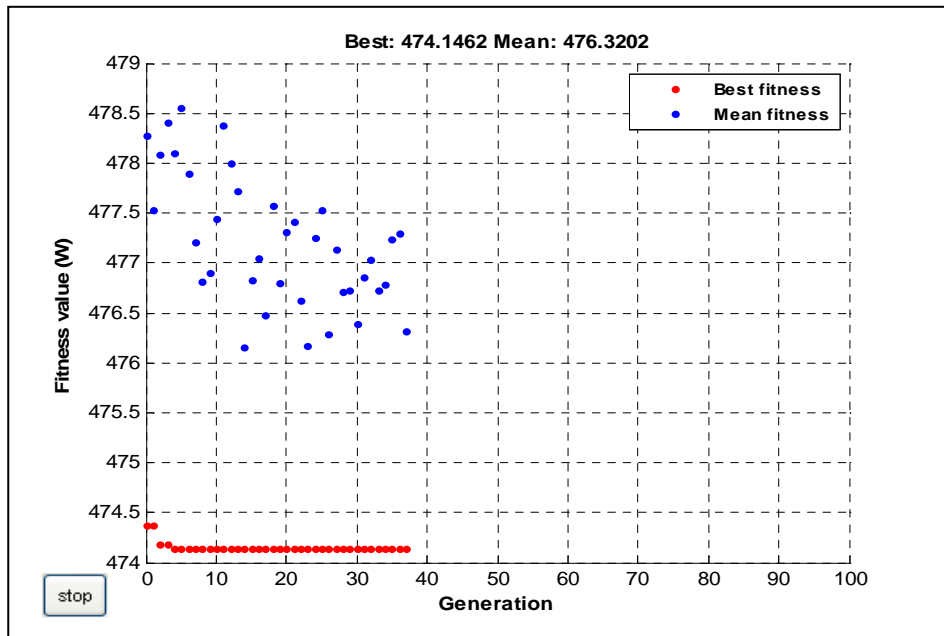
L'application de l'algorithme génétique à l'optimisation de la conception d'un moteur à induction est présentée dans le tableau 4-5. Nous comparons la tôle dreica' (2,3 W / kg) et la tôle dreica' (3,6W/kg), afin de définir le plus approprié des matériaux magnétiques (perméabilité élevée et / ou de faibles pertes). Le meilleur moyen Géorgie et la fonction des évolutions de remise en forme avec les générations pour chaque type de tôle sont présentés dans les figures. 3 et 4 et leurs résultats sont discutés ci-après:

#### a) les paramètres optimisées avec tôle d'acier 3.6 W/ kg

Abrév.	Paramètres	Unité	Solutions
$D$	Diamètre d'alésage	$mm$	99.39
$\delta$	Epaisseur de l'entrefer	$mm$	0.377
Ratio ( $h_{tr}/Z_{rt}$ )	Rapport géométrique- rotor	-----	2.63
$B_{t1}$	Induction -tête dent stator	$T$	1.55
$B_{t2}$	Induction - tête dent rotor	$T$	2.13
$MW$	Poids de la machine	kG	<b>22.67</b>
$\eta_{Opt}$	Rendement optimisé	-----	<b>0.8227</b>
$M$	Inductance mutuelle stator - rotor	$H$	0.12
$R'_r$	Résistance - rotor ramenée au stator	$\Omega$	2.24
$l'_{\sigma r}$	Inductance de fuite rotor ramenée au stator	$H$	0.0105
$l_{\sigma s}$	Inductance de fuite stator	$H$	0.0103
$R_s$	Résistance - phase enroulement .stator	$\Omega$	2.96

**Tableau. 4** Le paramètre de conception valeurs obtenues après optimisation de tôle d 'acier (3,6 W / kg)

Comme le montre la figure 3, le meilleur moyen GA fonction de remise en forme et nombre génération. La solution optimale est atteinte à la génération 37 et les données des meilleurs moteur indiqué au tableau 4. Il a également optimisé le moteur à air assumer leurs écart minimum et d'autres paramètres sont optimisés valeur à l'égard de leur préfixe rang.



**Fig. 4.2** Moyenne et les meilleures d'évolution des coûts obtenue avec l'algorithme génétique tôle d'acier 3,6 W / kg

**b) les paramètres optimisées avec tôle d'acier 2.3 W/ kg**

Abrév.	Paramètres	Unité	Solutions
$D$	Diamètre d'alésage	$mm$	99.41
$\delta$	Epaisseur de l'entrefer	$mm$	0.337
Ratio ( $h_{tr}/Z_{rt}$ )	Rapport géométrique- rotor	-----	2.664
$B_{t1}$	Induction -tête dent stator	$T$	2.06
$B_{t2}$	Induction - tête dent rotor	$T$	1.783
$MW$	Poids de la machine	kG	<b>21.42</b>
$\eta_{Opt}$	Rendement optimisé	-----	<b>0.8356</b>
$M$	Inductance mutuelle stator - rotor	$H$	0.11
$R'_r$	Résistance - rotor ramenée au stator	$\Omega$	2.23
$l'_{\sigma r}$	Inductance de fuite rotor ramenée au stator	$H$	0.0104
$l_{\sigma s}$	Inductance de fuite stator	$H$	0.0105
$R_s$	Résistance - phase enroulement .stator	$\Omega$	2.95

**Tableau. 5** Le paramètre de conception valeurs obtenues après optimisation de tôle d'acier (2.3 W / kg)

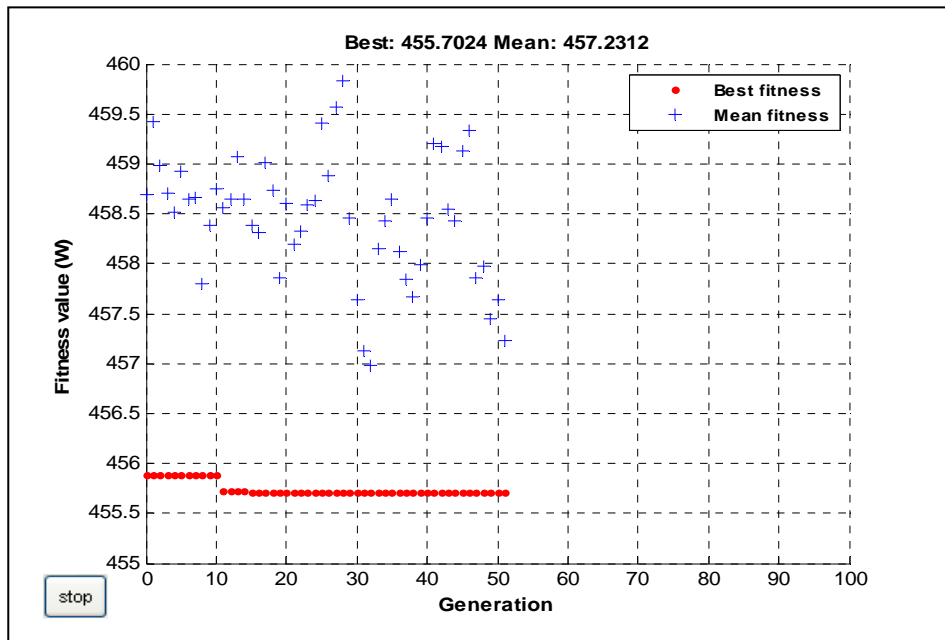


Fig. 4.3 Moyenne et les meilleures d'évolution des coûts obtenue avec l'algorithme génétique tôle d'acier 2.3W / kg

### 3.10 Analyse dynamique :

L'étude de l'évolution des courants et de la vitesse en régime dynamique de la machine asynchrone par simulation est un moyen très efficace pour valider nos résultats. La simulation permettra d'étudier l'influence de chaque paramètre et de calculer les grandeurs qui ne sont pas directement accessibles à la mesure (i.e. les courants rotoriques dans le cas de la cage).

Dans cette partie on vérifie par utilisation des blocs Simulink et PSB (Power System Block) du logiciel **Matlab** ; les paramètres obtenus par les méthodes d'optimisation : le couple de démarrage, le couple maximal. L'application de méthode d'optimisation précédente a permis de déterminer l'ensemble des résultats nécessaires à notre simulation.

### 4.1 Banc d'essai

Le schéma bloc concerné peut être utilisé en mode de fonctionnement génératrice ou bien moteur selon le signe du couple (positif pour le moteur négatif pour la génératrice). Le modèle de la machine est défini par quatre équations électriques et une équation mécanique du second ordre. Toutes les variables sont vues du côté stator et tous les paramètres sont ramenés au stator selon les axes d et q, [23].

Les équations électriques du modèle sont :

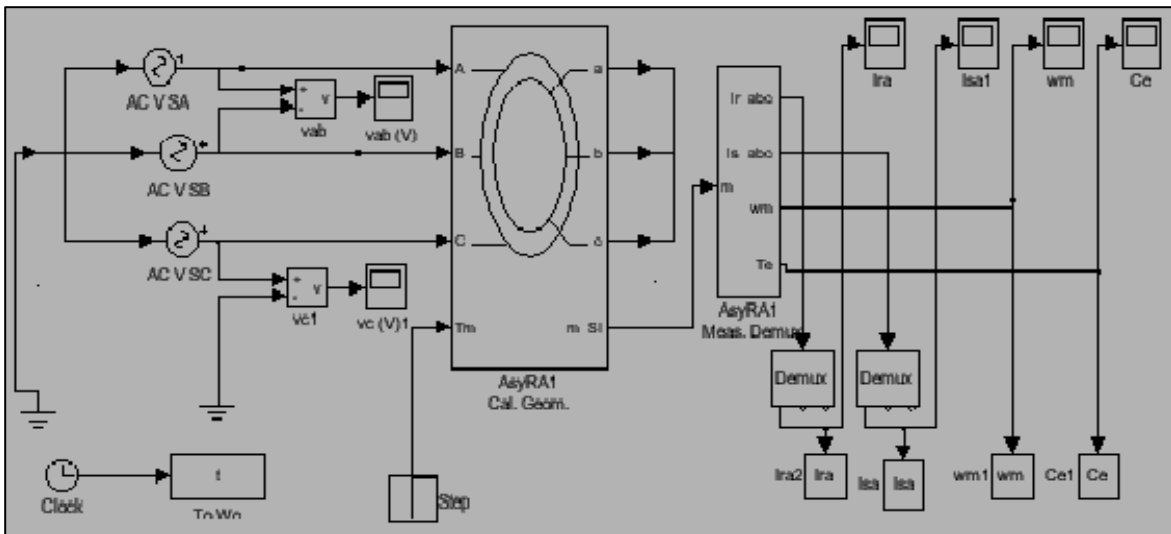
$$\begin{cases} V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega \cdot \phi_{ds} \\ V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega \cdot \phi_{qs} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} \end{cases} \quad (4-1)$$

$$C_e = 1.5p(\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds}) \quad (4-2)$$

L'équation mécanique est alors :

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2J}(C_e - f\omega_r - C_m); \quad \text{avec} \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega_r \quad (4-3)$$

La **Figure. 4.1** donne le schéma bloc global du banc d'essai de notre machine utilisant les blocs Simulink et PSB du logiciel **Matlab**.



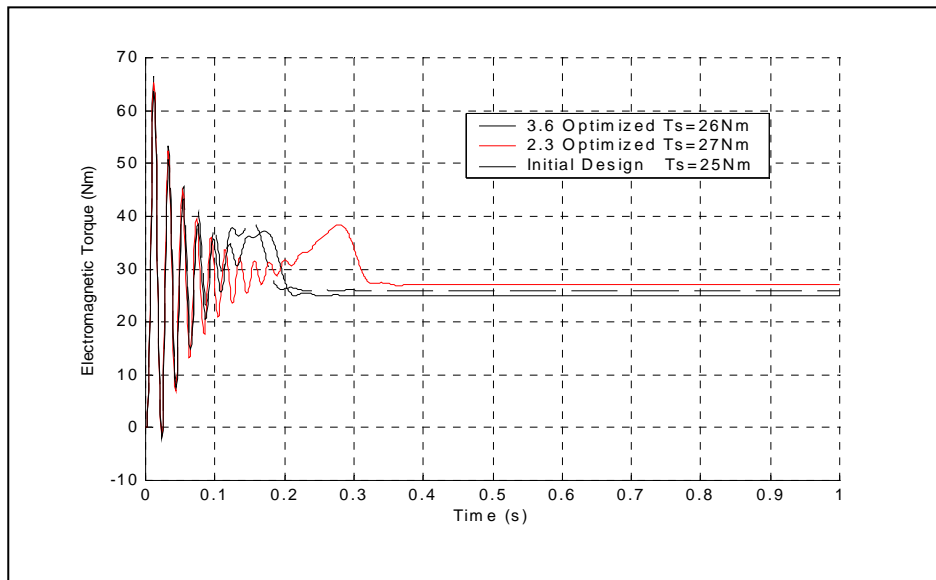
L'utilisation du modèle indiqué ci-dessus montre que l'identification des paramètres électriques ne suffit pas pour étudier les régimes dynamiques, qui sont de plus conditionnés par les paramètres mécaniques (moment d'inertie, frottement). Leur étude n'est efficace qu'a avec une connaissance de ces paramètres accompagnés d'une bonne précision. Les résultats obtenus par

identification expérimentale et par conception feront la base des données utilisées par la simulation

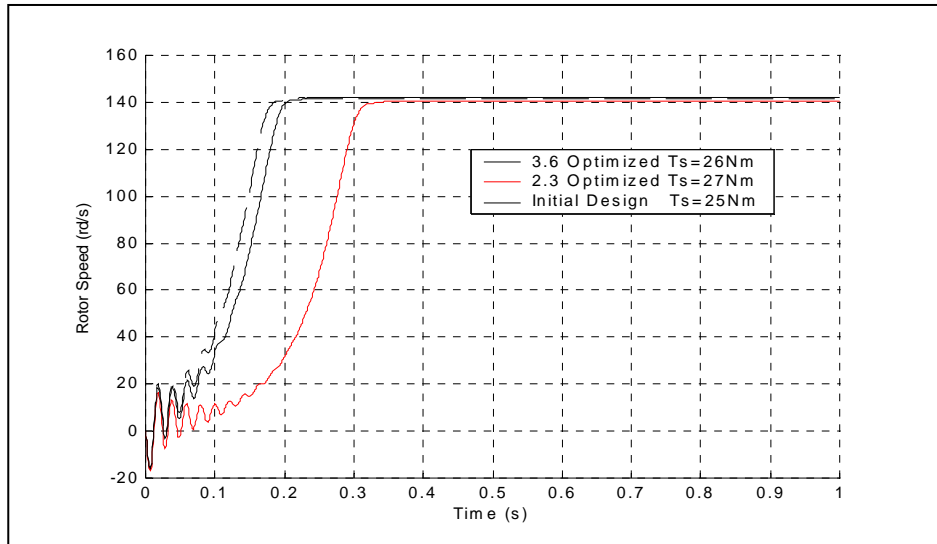
## 4.2 Résultats de simulation

Dans un premier test on appliquera à la machine un couple de démarrage afin de tester la capacité de la machine au démarrage ainsi que la valeur nécessaire a son décrochage au démarrage ensuite r la vérification du couple maximal de décrochage en marche normale.

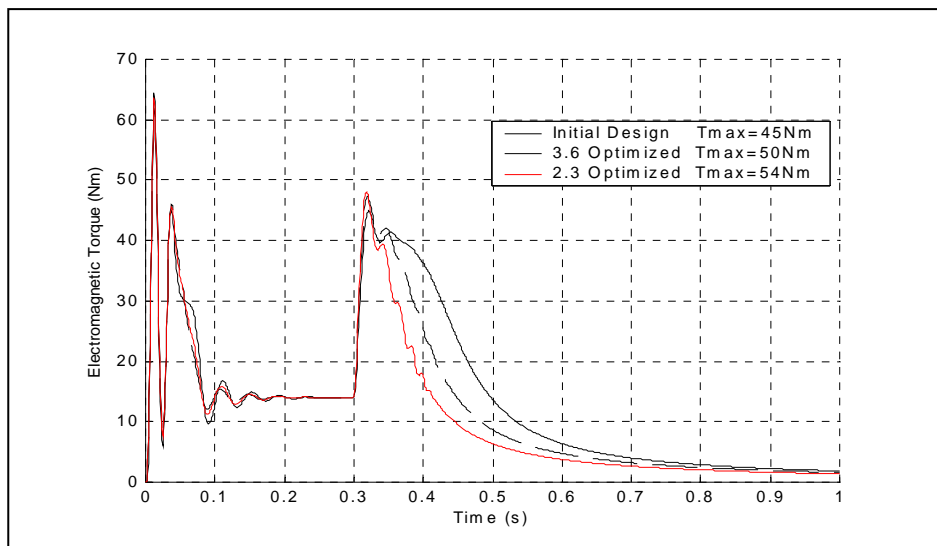
Les **Figures. 4.2** à **4.14** représentent des variations respectivement la vitesse  $\omega_r = f(t)$  et le couple électromagnétique  $C_e = f(t)$  pour les différents tests.



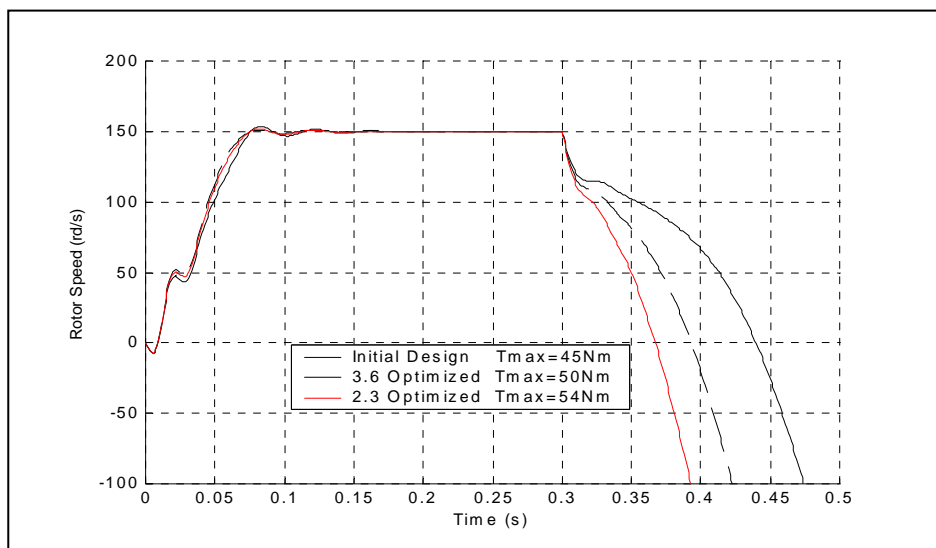
**Figure 5.** Couple électromagnétique (N.m) en fonction de tempe(time)



**Figure 6.** La vitesse rotorique(rd/s) en fonction de tempe(time)



**Figure 7.** Couple electromagnetique(N.m) en fonction de tempe(time)



**Figure 8.** La vitesse rotorique(rd/s) en fonction de tempe(time)

# **Conclusion générale**

# Conclusion générale

De tous les moteurs électriques, le moteur à induction est le plus répandu. Il n'est donc pas du tout surprenant de voir qu'il fait encore l'objet de nombreux travaux de recherche visant à améliorer sa modélisation et à optimiser sa conception. En effet, la résolution d'un problème d'optimisation consiste à explorer un espace de recherche afin de maximiser (ou minimiser) une fonction donnée. Les complexités (en taille ou en structure) relatives de l'espace de recherche et de la fonction à maximiser conduisent à utiliser des méthodes de résolutions radicalement différentes. En première approximation, on peut dire qu'une méthode déterministe est adaptée à un espace de recherche petit et complexe et qu'un espace de recherche grand nécessite plutôt une méthode de recherche stochastique (recuit simulé, algorithme génétique, ...).

Dans la plupart des cas, un problème d'optimisation se divise naturellement en deux phases : recherche des solutions admissibles puis recherche de la solution à coût optimal parmi ces dernières. Suivant la méthode employée, ce découpage est plus ou moins apparent dans la résolution.

L'usage d'un algorithme génétique est adapté à une exploration rapide et globale d'un espace de recherche de taille importante et est capable de fournir plusieurs solutions. Dans le cas où l'ensemble des solutions admissibles est complexe (i.e. il est difficile d'isoler une solution admissible), l'admissibilité peut être rendue intrinsèque à la représentation choisie ou intégrée à la génération des chromosomes (mutation, croisement) ou à la fonction à optimiser (on attribue une mauvaise adaptation à une solution non admissible). Mais il n'existe évidemment pas de dichotomie simple au sein de l'ensemble des problèmes d'optimisation : de nombreux problèmes sont fortement contraints et possèdent un vaste espace de recherche. Ces deux caractéristiques excluent l'usage direct d'un algorithme génétique.

Dans ce travail, nous avons présenté une nouvelle méthode d'optimisation où une est plongée dans un algorithme génétique.

La méthode a été appliquée au problème d'optimisation paramétrique (classique et difficile) d'une machine asynchrone de 2.2kW de puissance et l'analyse des résultats obtenus valide l'algorithme.

Les perspectives du projet (Génétique + conception avec contrainte) sont diverses :

- L'étude théorique analysant les propriétés de complexité, de convergence, « dynamique » de l'algorithme doit être poursuivie afin de permettre la conception d'opérateurs plus efficaces ainsi que la caractérisation des domaines d'application (variables à grand domaine, solutions admissibles complexes, ...)

- Voir le concept d'hybridation ;
- Les résultats obtenus sur le problème traité doivent être comparés à ceux obtenus avec les méthodes l'hybridation.

# **Références bibliographiques**

# ***Bibliographie***

- [1] Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, " Machines asynchrones Régime permanent " , D 3 480 , 2007
- [2] Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, " Moteurs asynchrones Choix et problèmes connexes " D 3 491, 2003
- [3] "Les Machines Asynchrones "site d'internete " de[http:// fr.wikipedia-org / wiki / Machine\\_synchrone](http://fr.wikipedia-org/wiki/Machine_synchrone) ".
- [4] **G. Pinson**, " Physique Appliquée C34 - Machine Asynchrone (MAS) " 2001
- [5] **M. Liwschitz**, " Calcul des Machines Electriques ",Tome 1 , Tome 2, Edition dunod, parie,France 1967
- [6] **P. Lebrun**, " Machine Asynchrone ", Polycopies de lycée Louis Armand, 173Bd de Strasbourg, 94736 NOGENT sur Marne, (Florence.vadee @ wanaadoo.fr).
- [7] **M.Kostenko, L.Piotroviski**, " Machine Electrique " , Tome 2, Edition Mir Moscou, 1969
- [8] **K. Khalfaoui, S. Harrache**, " Etude et Analyse des Procédés de Démarrage des Moteurs Asynchrones Triphasés " , Mémoire d'ingénieur, Encadré par Mr BELKHIRI Salah Université Med Boudiaf M'Sila, 2006.
- [9] **Meddeb Abdelmoumen**, " Moteur Asynchrone Tri phase " Mémoire d'ingénieur Lycée Secondaire Carthage présidence, Tunis 2001
- [10] Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, " Pertes dans les machines tournantes, " D 3 450, 2003
- [11] **Shili. Miloud, Gueddoudj. Ettayeb**, " Conception Assistée par Ordinateur des Machines Asynchrone à Rotor en Court Circuit " , Mémoire d'ingénieur, Encadré par Mr Mourad HAMMIMID Université Med Boudiaf M'sila ,2005
- [12] **Marcel Jufer**, " Moteur asynchrone " École polytechnique fédérale de Lausanne Laboratoire d'électromécanique et de machines électriques (LEME) addition 1995  
**et Jean-Claude Sabonnadiere**, Institut national polytechnique de Grenoble (INPG) Laboratoire d'électrotechnique de Grenoble (LEG)1995
- [13] **J.M.Renders**, "Algorithmes Génétiques et Réseaux de Neurones : Application a la commande de Processus "Edition, Paris, 1995
- [14] **D.E Goldberg**, " Algorithmes Génétiques :Exploration, Optimisation et Apprentissage Automatique"addition – wesley France (2 février 1980)
- [15] **www.eudil.fr**, (chercher dans : ressources en ligne)
- [16] **S. Chekroun, A. Benoudjit, B. Abdelhadi**, " Efficiency Improvement of Induction Motors a Structural Analysis ",Conference on Electrical Engineering,CEE04, 7-8. 2006,

- [17] **A. Benoudjit, B. Abdelhadi, N. Nait-Said, S. Idir**, " High Efficiency Induction Motors- Impact On Energy Saving Potential in Algeria ", Conference on Electrical Engineering, CEE02, 10-11 Dec. 2002, pp. 1- 6.
- [18] **Guy. Olivier, Réal - Paul. Bouchard**, " Circuit et Machines Electriques " , Edition de l'école Polytechnique, Montréal 1995
- [19] **F. Ziane, F. Zouaou**, " Modélisation et Identification des Machines Asynchrones a Haut Rendement par L'exploitation des Algorithmes Génétiques ", Mémoire d'ingénieur, Encadré par Mr CHEKROUN Salim Université Med Boudiaf M'Sila, 2006.
- [20] **A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, M. Pastorelli**, " International Standards for the Induction Motor Efficiency Evaluation a Critical of the Stray Load Loss Determination ", Conference Proceedings on Industry Applications, Italy , 12-16 Oct. 2003, pp. 841- 848.
- [21] **Dr. Ing M. liwschitz**, Calcul des circuits magnétiques. Préface de J. Chatelin titulaire de la chaire de machines électriques LAUSANNE, Le 07 juillet 1967.