

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



UNIVERSITE 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 DIPLÔME  
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

**OPTION: COMMANDE ELECTRIQUE**

## THEME

---

**OPTIMISATION MAGNETIQUE ET ELECTRIQUE DES MACHINES ASYNCHRONES  
A HAUT RENDEMENT**

---

Proposé et dirigé par :

Monsieur: S. CHEKROUN

Présenté par :

BENSAID Hanane  
MAAZA Nawel  
TEBBAKH Samia

Année Universitaire : 2006 / 2007

# Remerciements

*Ce travail a été réalisé au sein du département d'électrotechnique de l'université Mohamed Boudiaf, M'sila.*

*Nous tenons à remercier tout d'abord et avant tout "Dieu seul".*

*Nous tenons à remercier notre promoteur monsieur "**S. Chekroun**", d'avoir accepter de nous encadrer et de nous suivre durant toute cette période, pour la grande bienveillance qu'il nous a accordé et pour leur efficaces et précieuses aides, tout le long d'achèvement de ce mémoire.*

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

*Enfin, nos remerciement à toute personne ayant participée de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

# Dédicace

*Je n'aurais jamais une occasion meilleure que celle-ci pour exprimer mon profond respect, ma reconnaissance et mon grand amour à l'égard des personnes que j'aime qui m'ont toujours encouragé et soutenu.*

*Au symbole de la tendresse et l'affection, à celle qui s'est privée de tous pour me combler, à ma mère, l'être le plus chère du monde, quoique je dise ou je fasse, cela n'exprime par le degré de ma gratitude et mon amour vers elle.*

*A un grande homme pour lequel je garde un estime particulier... cher père, celui qui tant sacrifié pour que j'arrive à un avenir florissant : je lui doit énormément.*

*A mes frères et sœurs ainsi que toute la famille, sans oublier toutes mes amies en particulier ceux qui ont m'aidé et m'encouragé durant notre travail.*

*A toute la promotion d'électrotechnique, année 2007.*

*HANANE*

# *Notation et symbole*

P	Nombre de paire de pole	
$n_s$	Vitesse de synchronisme ou du champ tournant	trs/min
g	Glissement	
f	Fréquence	Hz
$C_u$	Couple utile	N.m
$C_{\text{élé}}$	Couple électromagnétique	N.m
$C_n$	Couple nominal	N.m
$C_r$	Couple résistant	N.m
$\eta$	Rendement	
$P_u$	Puissance utile	W
$P_a$	Puissance absorbée	W
$P_f$	Perte par effet de Foucault	W
$B_m$	Induction maximale	T
$K_r$	Coefficient caractéristique de tôle	
e	Epaisseur de tôle	
$P_h$	Perte par hystérésis	W
$K_h$	Coefficient de perte par hystérésis	
$P_{v+p}$	Perte par ventilation et par frottement dans les paliers	W
$V_t$	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
$P_{tr}$	Puissance transmise au rotor	W
$P_{js}$	Perte joule statorique	W
$P_{jr}$	Perte joule rotorique	W
$P_{fs}$	Perte fer statorique	W
$P_M$	Perte mécanique	W
U	Tension composée	V
V	Tension simple	V
I	Valeur du courant efficace continu ou alternatif	A
J	Valeur du courant simple	A
N	Nombre d'individu de la population ou taille de population	
x	Nombre réel	
g	Nombre entier	
M	Nombre de gènes	
$S_1, S_2$	La somme de fonction d'évaluation	
$P_1, P_2$	Parents de la population	
$C_1, C_2$	Enfants de la population	
K	Nombre de bits composant un chromosome	
F	Fonction simple	
t	Instant	s
$\alpha$	Coefficient de pondération aléatoire	
$\tau$	Nombre	
$P_S$	Probabilité de sélection	

F	Nombre d'évaluation totale	
a, b	Nombre réel	
$V_j$	Code binaire de chaque chromosome binaire	
$f_{eval}$	Fonction d'évaluation	
q	Probabilité cumulative	
$V_1, V_2, V_3, V_4$	Vecteur de la génération initiale en binaire	
$P_s$	Puissance apparente	W
$B_\delta$	L'induction dans l'entrefer	T
$A_1$	Densité linéaire de courant	A/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	
$\tau_p$	Pas polaire	
$m_1, m_2$	Nombre de phase primaire et secondaire	
$N_1$	Nombre de spire par phase statorique	
$\lambda$	Rapport magnétique	
$K_{d1}$	Facteur de distribution	
$K_{P1}$	Facteur de raccourcissement	
$\Phi$	Flux par pôle	Wb
C'	L'ouverture de la bobine	
H	Intensité du champ magnétique	
F.M.M	Force magnétique total	A/m
B	Rapport de raccourcissement	At
$H_i$	Intensité du champ pour chaque tronçon	
$B_i$	L'induction dans chaque tronçon	A/m
$S_i$	Section de chaque tronçon	T
$\mu_0$	Perméabilité magnétique de l'aire	mm <sup>2</sup>
$\mu_{ri}$	Perméabilité relative du matériau	
$H_\delta$	Intensité du champ dans l'entrefer	
$F_\delta$	Force magnétomotrice dans l'entrefer	A/m
$\varphi_i$	Flux par pôle dans chaque tronçon	At
$\delta$	Entrefer	Wb
$\delta'$	Entrefer fictif	
$S_\delta$	La surface virtuelle traverse par le flux	
$b_i$	Pas polaire virtuel	mm <sup>2</sup>
$\alpha_i$	Coefficient d'aplatissement de la courbe	
$B_{\delta eff}$	Induction dans l'entrefer efficace	T
$B_{\delta max}$	Induction dans l'entrefer maximale	T
$B_Z$	Induction de la dent	T
$\varphi_\delta$	Le flux dans l'entrefer	T
$h_z$	Hauteur de la dent	Wb
$H_{z.min}$	Valeur du champ magnétique minimum dans la dent	m
$H_{z.med}$	Valeur du champ magnétique médian dans la dent	A/m
$H_{z.max}$	Valeur du champ magnétique maximum dans la dent	A/m
$H_{z.moy}$	Valeur du champ magnétique moyenne dans la dent	A/m
$H_z$	Champ magnétique dans la dent	A/m
$B_\delta$	Induction dans l'entrefer	A/m
		T

$F_z$	Chute de potentiel magnétique dans la dent	A/t
$B_{ji}$	Induction de la culasse statorique $i=1$ ou rotorique $i=1$	m
$h_{ji}$	Epaisseur de la culasse statorique $i=1$ ou rotorique $i=1$	m
$l_{ji}$	Longueur du tronçon du circuit magnétique pour la culasse	
$K_{fe}$	Facteur de remplissage, compte tenu du foisonnement	
$L_{fe}$	Longueur d'empilage sans les canaux de ventilation	m
pt	Pont rotorique	
$F_{z1}, F_{z2}$	Force magnétomotrice au dent statorique et rotorique	A/t
$F_{j1}, F_{j2}$	Force magnétomotrice dans la culasse statorique et rotorique	A/t
$K_s$	Coefficient de saturation	
$K_f$	Coefficient de forme	
$K_c$	Coefficient de carter	
$I_m$	Courant magnétisant	A
$h_{zi}$	Profondeur de l'encoche statorique $i=1$ ou rotorique $i=1$	m
$P_{cu1}$	Pertes en cuivre dans le stator	W
$P_{cu2}$	Pertes en cuivre dans le rotor	W
$I_1$	Courant par phase	A
$I_{bar}$	Courant par bar	A
$R_1, R_2$	Résistance statorique et rotorique par phase	$\Omega$
$P_w$	Pertes par courant de Foucault	W
$\sigma_w$	Constante de fer	
$S_t$	L'épaisseur de la tôle de fer	m
$P_{hz}$	Pertes d'hystérésis dans les dents d'encoche statorique	W
$\sigma_H$	Constante du matériau utilisé	
$P_{wz}$	Pertes par courant de Foucault dans les dents	W
$m_z$	Masse totale des dents	Kg
$P_{sup}$	Pertes supplémentaires	W
$\cos\alpha$	Facteur de puissance	

# SOMMAIRE

## Introduction Générale

Généralité.....	1
Objectif.....	2
Structure du mémoire.....	2

## Chapitre Un

### Notions générales sur les Machines Asynchrones

1.1 Introduction.....	3
1.2 Généralité sur les machines asynchrones.....	4
1.2.1 Définition.....	4
1.2.2 Organisation de la machine asynchrone.....	4
1.2.2.1 Le stator.....	5
1.2.2.2 Le rotor.....	5
1.2.2.2.1 Rotor à cage (rotor en court circuit.) .....	5
1.2.2.2.2 Rotor à bague.....	7
1.2.2.3 Organes mécaniques.....	8
1.2.3 Choix de nombre d'encoches.....	8
1.2.4 L'entrefer.....	9
1.2.5 L'isolation.....	9
1.2.6 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone.....	9
1.2.7 Glissement d'une machine asynchrone.....	11
1.2.8 Caractéristique de fonctionnement.....	11
1.2.8.1 Fonctionnement à vide.....	11
1.2.8.2 Fonctionnement à charge.....	12
1.2.8.3 Les domaines de fonctionnement de la machine asynchrone.....	12
1.2.8.4 Caractéristique mécanique $C_U = f(n)$ .....	12
1.2.8.5 Guide de la sélection d'une machine asynchrone.....	13
1.2.9 Le rendement.....	14
1.2.9.1 Les pertes dans les machines asynchrones.....	14
1.2.9.2 Les pertes électriques.....	14
1.2.9.3 Les pertes magnétiques de fer.....	14
1.2.9.3.1 Les pertes par courant de Foucault.....	14
1.2.9.3.2 Les pertes par hystérésis.....	15
1.2.9.4 Les pertes mécaniques.....	16
1.2.9.4.1 Les pertes par ventilation.....	16
1.2.9.4.2 Les pertes par frottement dans les paliers.....	16
1.2.9.4.3 Les pertes par frottement dans les roulements.....	17
1.2.9.4.4 Les pertes aérodynamiques.....	17
1.2.9.4.5 Les pertes complémentaires.....	17
1.2.10 Bilan des puissances.....	19
1.3 Conception assistée par Micro- Ordinateur.....	20
1.3.1 Définition.....	20
1.3.1.1 La conception.....	20

1.3.1.2 La conception assistée.....	21
1.3.1.3 La conception assistée par ordinateur.....	21
1.3.2 Avantages.....	22
1.4 Conclusion.....	22

## Chapitre Deux

### Principe des Algorithmes Génétiques

2.1 Introduction.....	23
2.2 Historique.....	24
2.3 Définition des algorithmes génétique.....	24
2.4 Vocabulaire utilisé par les algorithmes génétiques.....	25
2.5 Application des algorithmes génétiques.....	26
2.6 Différence fondamentale entre AG et autres méthodes.....	26
2.7 Principe.....	27
2.7.1 Principe général des fonctionnements.....	27
2.8 Description détaillée.....	29
2.8.1 Le codage.....	29
2.8.1.1 Codage binaire.....	29
2.8.1.2 Codage par valeurs réelles.....	30
2.8.2 Génération aléatoire de la population initiale.....	31
2.8.3 Evaluation.....	31
2.8.4 Fonction objective et fonction fitness.....	32
2.8.5 Sélection.....	32
2.8.5.1 Sélection par roulette(wheel).....	33
2.5.8.2 Sélection par rang.....	34
2.5.8.3 Sélection steady – state.....	34
2.8.5.4 Elitisme.....	35
2.8.5.5 Sélection par tournoi.....	35
2.8.6 Croisement.....	35
2.8.6.1 Croisement binaire.....	36
2.8.6.1.1 Croisement en un point.....	36
2.8.6.1.2 Croisement en deux points.....	36
2.8.6.2 Croisement réel.....	37
2.8.6.3 Croisement barycentrique.....	37
2.8.7 Mutation.....	38
2.8.7.1 Probabilité de mutation.....	39
2.8.7.2 Méthodes de mutation.....	40
2.8.7.2.1 Mutation binaire.....	40
2.8.7.2.2 Mutation réelle.....	40
2.8.7.2.3 La mutation uniforme.....	40
2.8.7.2.4 Mutation non uniforme.....	40
2.8.8 Critère d'arrêt.....	41
2.9 Les problèmes de l'algorithme génétique.....	41
2.9.1 Le codage.....	41
2.9.2 La dominance.....	41
2.9.3 Le croisement.....	41
2.9.4 Les chromosomes haploïdes et diploïdes.....	42

2.10 Application des AG <sub>S</sub> aux fonctions mathématiques.....	42
2.10.1 Procédure de maximisation des fonctions par algorithmes génétiques.....	42
2.10.2 Exemple simple.....	43
2.11 Conclusion.....	47

## Chapitre Trois

### Moteurs Asynchrone à Haut Rendement

3.1 Introduction.....	48
3.2 Moteur asynchrone à haut rendement.....	49
3.3 Caractéristiques des moteurs à haut rendement.....	50
3.4 L'économie d'énergie en utilisant E-E-M <sub>S</sub> .....	51
3.4.1 Qualité du moteur.....	51
3.4.2 Taille du moteur.....	51
3.4.3 Coût du moteur.....	52
3.5 Procédé d'économie l'énergie.....	52
3.5.1 Avantage d'économisé l'énergie.....	52
3.5.1.1 Energitique.....	52
3.5.1.2 Environnement.....	53
3.5.1.3 Aspects économiques.....	53
3.6 Le rendement d'un moteur asynchrone.....	53
3.7 Evaluation du rendement d'une machine asynchrone.....	54
3.8 Normes et méthodes d'évaluation le rendement.....	55
3.8.1 IEEE 112-B.....	55
3.8.1.1 Essai thermique à une charge donnée.....	56
3.8.1.2 Essai à vide.....	56
3.8.1.3 Essai à la charge variable sous condition donnée.....	56
3.8.2 IEC 60034-2.....	56
3.8.2.1 Méthode directe.....	57
3.8.2.2 Méthode indirecte.....	57
3.8.3 JEC 37.....	57
3.9 Méthodes de mesures.....	58
3.9.1 Méthode 1.....	58
3.9.2 Méthode 2.....	58
3.9.3 Méthode 3.....	58
3.9.4 Méthode 4.....	58
3.9.5 Méthode 5.....	58
3.10 Techniques d'augmentation le rendement de moteur asynchrone.....	59
3.11 Conclusion.....	59

## Chapitre Quatre

### Amélioration du Rendement de la MAS par l'AG

4.1 Introduction.....	61
4.2 Conception de la machine.....	61

4.2.1 Calcul préliminaire.....	61
4.2.2 Dimensionnement des encoches.....	62
4.2.2.1 Encoche statorique.....	63
4.2.2.2 Encoche rotorique.....	63
4.2.3 Enroulement de la machine.....	63
4.2.4 Calcul de la F.M.M.....	63
4.2.4.1 Chutes de potentiels magnétiques partiels.....	64
4.2.4.1.1 La chute de potentiel magnétique dans l'entrefer.....	64
4.2.4.1.2 La chute de potentiel magnétique dans les dents.....	65
4.2.4.1.3 La chute de tension magnétique dans la culasse.....	65
4.2.4.2. Coefficient de saturation.....	66
4.2.4.3 Coefficient de forme de la courbe d'induction.....	67
4.2.4.4 Facteur de carter(correction de l'entrefer).....	67
4.2.4.5 Courant magnétisant.....	67
4.2.5 les pertes.....	67
4.2.5.1 Pertes en cuivre.....	67
4.2.5.1.1 Dans le stator.....	67
4.2.5.1.2 Dans le rotor.....	68
4.2.5.2 Pertes fer.....	68
4.2.5.2.1 Pertes d'hystérésis.....	68
4.2.5.2.2 Pertes par courants de Foucault.....	68
4.2.5.2.3 Pertes dans les dents.....	68
4.3 Notre proposition.....	69
4.3.1 Tableaux de résultats.....	69
a) Influence de l'induction magnétique et la charge linéaire.....	70
b) Influence de la fréquence.....	73
4.3.2 Les courbes.....	76
a) Influence de l'induction magnétique et la charge linéaire.....	76
b) Influence de la fréquence.....	78
4.4 Analyse et interprétation des résultats.....	79
4.5 Conclusion.....	80

## **Conclusion Générale**

Conclusion générale.....	81
--------------------------	----

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

# Introduction Générale

## *1 Généralités*

Les moteurs asynchrones représentent approximativement 90% de la consommation totale des moteurs électriques.

Le fonctionnement de la machine à induction est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, crée par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par la source d'alimentation et les courants induits dans l'enroulement rotorique. Lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par ce champ tournant. Cette interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant diffère de celle de rotor. Le fonctionnement d'une machine asynchrone est comparable à celui d'un transformateur dont l'enroulement secondaire est en court-circuit et tournant.

La conception des machines électriques est un procédé très délicat puisqu'il n'existe pas de théorie précise pour le calcul des machines, ou plutôt des méthodes de calcul plus ou moins précises basées sur des diagrammes établis à partir d'études statistiques. En effet, l'étude des caractéristiques de la machine à induction est basé sur un modèle mathématique qui possède un caractère multi variable, non linéaire et fortement couplé. Les paramètres définissant son modèle sont en général dépendant de la position de son point de fonctionnement qui dépend non seulement de sa charge, mais aussi de son degré de saturation et de sa température de fonctionnement.

Plusieurs algorithmes de calcul ont été développés pour de nombreuse application afin d'optimiser divers objectifs avec des contraintes qui doivent être satisfaites. Chacun d'eux a ses propres caractéristiques favorables tel que les propriétés de la convergence. Par conséquent, le choix des techniques d'optimisation utilisées dépend des problèmes confrontés.

Les techniques de calcul évolutionnaires deviennent de plus en plus populaire, vu leur grand potentiel dans la résolution des problèmes d'optimisation complexes, souvent impossible à traiter avec les méthodes d'optimisation classiques.

On propose dans ce travail d'utiliser les algorithmes génétiques pour minimiser la fonction objective qui est la somme des pertes, car la décroissante de conservation d'énergie s'augmente jours après jours, et ça nous a provoqué des problèmes pour les applications dans l'industrie.

## **2 Objectifs**

Suite aux problèmes précédents, tout au long de ce travail, nous avons gardé comme objectifs les points suivants :

- Proposer une méthode d'optimisation basée sur les algorithmes génétiques.
- Développer et appliquer cette technique à l'amélioration du rendement des machines produites par le fabricant algérien d'I.E.E .AZAZGA pour différentes gammes de puissance avec l'action sur des paramètres à savoir :l'induction magnétique, la charge linéaire et la fréquence.
- Vérifier la tendance de la machine, magnétique ou bien électrique.

## **3 Structure du mémoire**

Notre mémoire sera scindé en quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre est destiné à l'aspect théorique de la machine asynchrone, avec une petite vision sur la conception assistée par ordinateur (C.A.O).

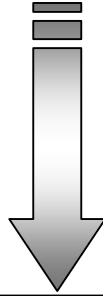
Dans le deuxième chapitre en va mettre en relief l'application d'algorithme génétique. Les notions directement inspirées de la théorie d'évolution, qui interviennent dans ces algorithmes sont explicitées. Pour mieux comprendre le fonctionnement de ces algorithmes, on va donner un exemple simple à la fin de ce chapitre.

A propos du troisième chapitre, nous allons faire un petit passage sur l'économie d'énergie et ses avantages ainsi qu'une étude sur les moteurs asynchrones à haut rendement, on situera les méthodes de mesure de leurs rendements et les techniques de l'augmenter.

Le quatrième chapitre contient le fruit de notre mémoire qui est l'amélioration du rendement des machines de AZAZGA, on commence par une procédure de calcul des paramètres de ces derniers ensuite elle vient notre proposition par l'application des AGs.

Finalement on terminera par une conclusion générale, exposant les différents résultats obtenus et dégagant les perspectives à envisager.

# CHAPITRE 01



NOTIONS GÉNÉRALES  
SUR LES MACHINES  
ASYNCHRONES

## 1.1 Introduction

Du fait de la simplicité de sa construction, sa robustesse, sa faible maintenance, la facilité de son alimentation, et surtout son faible prix d'achat, la machine asynchrone ou machine à induction couvre la plupart des applications domestiques (machine à laver, réfrigérateur, etc.), industrielles (machine d'entraînement, machinerie de transformation), dans les transports (traction ferroviaire, véhicule électrique) et dans les domaines spécialisés (auxiliaires dans les centrales électriques, machinerie en milieu explosif, etc.).

Par contre, la complexité de mise en œuvre de sa commande a longtemps limité son développement sur le marché des variateurs. Pourtant, les récents progrès de l'électronique de commande et de la micro électronique permettent aujourd'hui d'intégrer des commandes de plus en plus complexes.

Dans les pays industrialisés, plus de 60% de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie mécanique.

Les machines asynchrones, à la différence des machines synchrones, sont utilisées surtout comme moteur, elles peuvent fonctionner en génératrice quand le rotor est entraîné dans le sens du champ tournant à une vitesse supérieure à celle du synchronisme.

Le moteur asynchrone est le type le plus répandu des moteurs électriques, sa prépondérance par rapport aux autres moteurs est due aux inconvénients présentés par ses dernières, on peut citer :

- Pour le moteur synchrone classique, la nécessité de l'accrochage sur le réseau.
- Pour le moteur à collecteurs, le prix et la fragilité relative des collecteurs.
- Le moteur asynchrone dans sa solution à cage est le moins cher et le plus robuste, [1].

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

## 1.2 Généralités sur les machines asynchrones

### 1.2.1 Définition

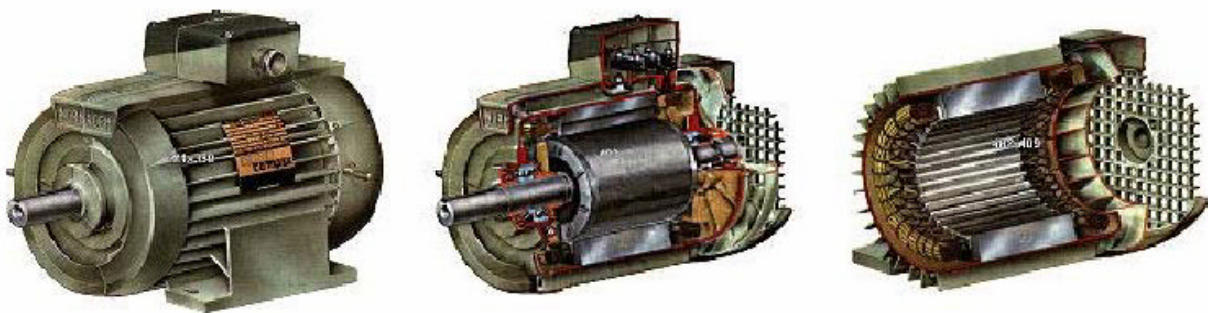
Une machine asynchrone connue également sous le terme « anglo-saxon », est une machine à courant alternatif dont la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales. Le rotor est toujours en retard par rapport à la vitesse du champ statorique. La machine asynchrone est dite machine à induction car l'énergie transférée du stator au rotor ou inversement se fait par induction électromagnétique.

Son invention est attribuée à Nikola Tesla en 1887. En 1889 Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski (ou Michael von Dolivo-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.

L'inconvénient principal des moteurs asynchrones est qu'il est très difficile de faire varier leur vitesse et le fort courant appelé au démarrage. Le principe de moteur à double cage, découvert en 1912 par Paul Boucherot a permis de pallier cette seconde difficulté. Grâce aux progrès de l'électronique de puissance, il est maintenant possible de faire fonctionner cette machine 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, [2].

### 1.2.2 Organisation de la machine asynchrone

Les machines asynchrone, appelées également machine à induction sont des convertisseurs électromagnétique tournant transformant l'énergie électrique en énergie mécanique.



**Fig.1.1** Machine asynchrone

Les moteurs asynchrones sont pratiquement tous des moteurs triphasés. Ils sont basés sur l'entraînement d'une masse métallique par l'action d'un champ tournant.

L'organisation d'une machine asynchrone est constituée des principaux éléments suivants :

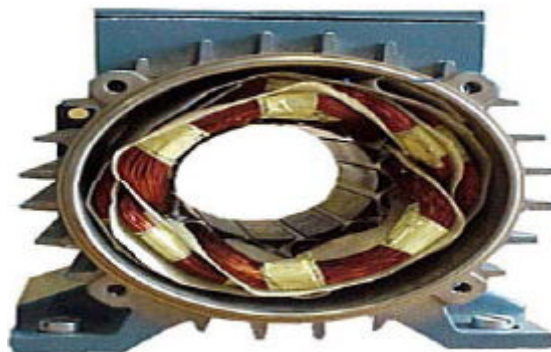
- Le stator (partie fixe) constitué de disques en tôle magnétique portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- Le rotor (partie tournante) constitué de disques en tôle magnétique empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement bobiné ou injecté.
- Les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous ensembles, [3].

### 1.2.2.1 Le stator

Appelé aussi inducteur ou primaire, Il est constitué d'un cylindre ferromagnétique entaillé d'encoches permettant d'y loger les bobinages. Ce cylindre est constitué d'un empilement de plaques de tôle afin de limiter les courants de Foucault. Ces tôles comportent un certain nombre d'encoches régulièrement réparties qui, par suite de l'empilage créent des rainures, ou sont logés des faisceaux du bobinage, [2].

La figure (1.2) représente un stator comporte un bobinage triphasé, dont chaque phase ne comporte qu'une bobine occupant deux encoches diamétralement opposées, les trois phases sont identiques mais décalées entre elle de  $2\pi/3$ .

Cet enroulement (bobines), est alimenté en triphasé par l'intermédiaire de la plaque à borne ce qui permet de l'alimenter en étoile ou en triangle, et possède  $p$  paires de pôles, [4].



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

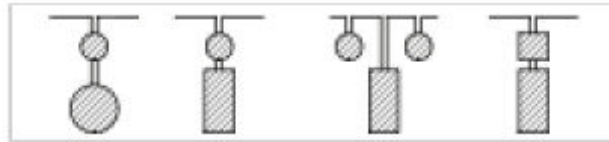
### 1.2.2.2 Le rotor

Le rotor n'est lié électriquement à aucune source d'énergie. (ni continue, ni alternative) ce qui simplifie beaucoup sa construction on distingue deux types de rotor.

#### 1.2.2.2.1 Rotor à cage (rotor en court-circuit)

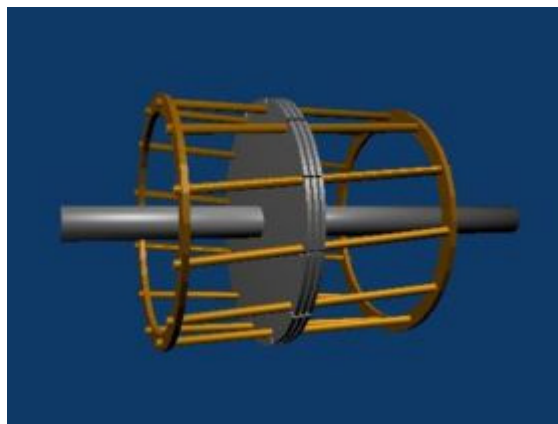
C'est le plus fréquent. Ce type de rotor a été inventé par Michail Ossipowitsch Doliwo - Dobrowolski au début des années 1890. Ces rotors sont constitués de tôles

ferromagnétiques et de barres conductrices régulièrement réparties à la périphérie du rotor. Les barres sont reliées entre elles. Travers deux anneaux de court-circuit (voir figure 1.4). On peut rencontrer plusieurs formes de barres (voir la figure ci-dessous) [2].



**Fig.1.3** Différentes formes de barres

Les tôles ferromagnétiques servent à guider les lignes de champs tandis que les barres accueillent les courants induits. Ces rotors sont réalisés à partir d'un empilement de tôles découpées et isolées les unes des autres (feuilletage) dans lesquelles on injecte un matériau conducteur de manière à constituer les barres ainsi que les anneaux de court-circuit. Le matériau constituant les barres et les anneaux de court-circuit généralement un alliage à base d'aluminium, mais on peut aussi rencontrer du cuivre ou du laiton. En général, les barres sont légèrement inclinées suivant l'axe du rotor afin que le nombre de barres présente sous une phase statorique constant quelque soit la position du rotor. Ce procédé permet de diminuer la variation de la réluctance du circuit magnétique au cours de la rotation du rotor (ou « effet d'encoches ») et de diminuer ainsi les oscillations de couple. C'est cette inclinaison des encoches qui donne à l'ensemble barre plus anneaux de court-circuit la forme d'une cage d'écureuil déformée, [2].



**Fig.1.4** structure d'un rotor en cage d'écureuil

On distingue deux types de rotor à cage :

- Rotor à simple cage
- Rotor à double encoche ou à encoches profondes :

Ces rotors utilisent l'effet de peau dans les conducteurs afin de faire varier la résistance du rotor en fonction de la vitesse du fonctionnement de la machine. L'effet de peau est un phénomène électromagnétique qui fait que plus la fréquence des courants augmente, plus le courant a tendance à ne circuler qu'en surface des conducteurs. Ainsi, au démarrage, la fréquence des courants rotorique est égale à celle de l'alimentation et le courant n'utilise que la partie supérieure de la barre. Puis, au fur et à mesure que la vitesse de rotation du rotor augmente, la fréquence des courants rotorique diminue et le courant utilise une surface de plus en plus importante des barres. Ces topologies de rotor permettent un démarrage avec un couple plus important lorsque la machine est alimentée par une source de tension fixe (sans variateur) Ce type de moteur, est très utilisé, notamment dans le cas des moteurs à haute tension à fort couple de démarrage, [2].



**Fig.1.5.a** Coupe d'un rotor à cage à encoche profonde



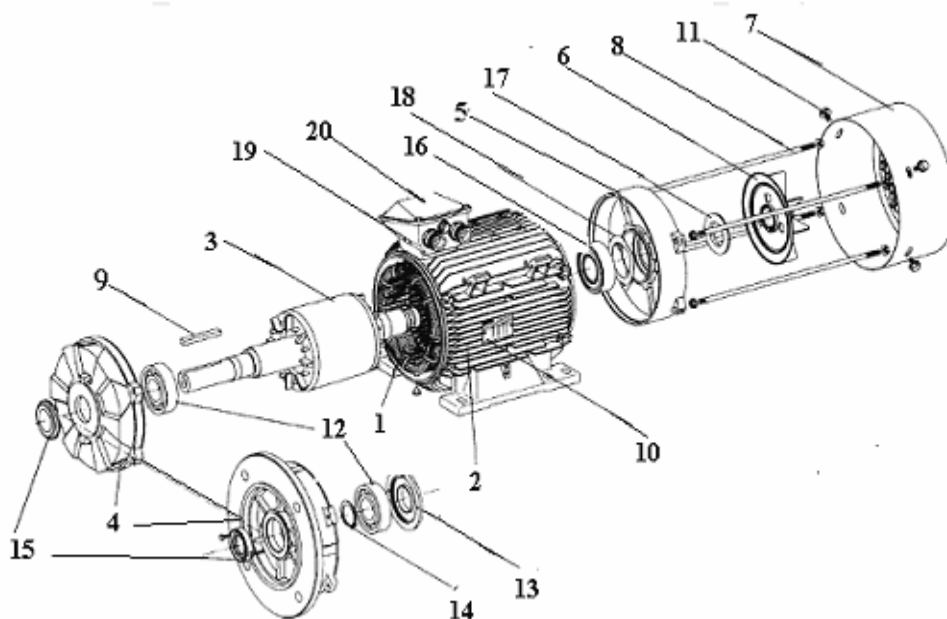
**Fig.1.5.b** Tôle utilisée pour la réalisation d'une cage à double encoches

#### 1.2.2.2.2 Rotor à bague

Le rotor d'une machine à bague est constitué de 3 bobines (on parle aussi de rotor bobiné). Chaque bobine est reliée à une bague. Les bagues permettent d'avoir une liaison électrique avec les bobines du rotor. Ce type de rotor a été conçu pour permettre la variation de résistance du rotor en insérant des résistances en série avec les bobines afin de réaliser un démarrage rotorique. Ce dispositif a ensuite permis la variation de vitesse avec un rendement acceptable au moyen d'un procédé appelé cascade hyposynchrone. Donc ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles ou bien nombreux. Le coût élevé de ce type de machines et l'apparition des variateurs de fréquence a rendu obsolètes ce type de machines, [2].

### 1.2.2.3 Organes mécaniques

Le stator auto-porteur 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 (axiale ou radiale). 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 Lentes, [3].



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

**Fig.1.6** les organes de la machine asynchrones

### 1.2.3 Choix du nombre 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 adoptée. 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, [4].

#### **1.2.4 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  $p \geq 12$ , 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, [4].

#### **1.2.5 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 presspan de 2,5 mm d'épaisseurs, [4].

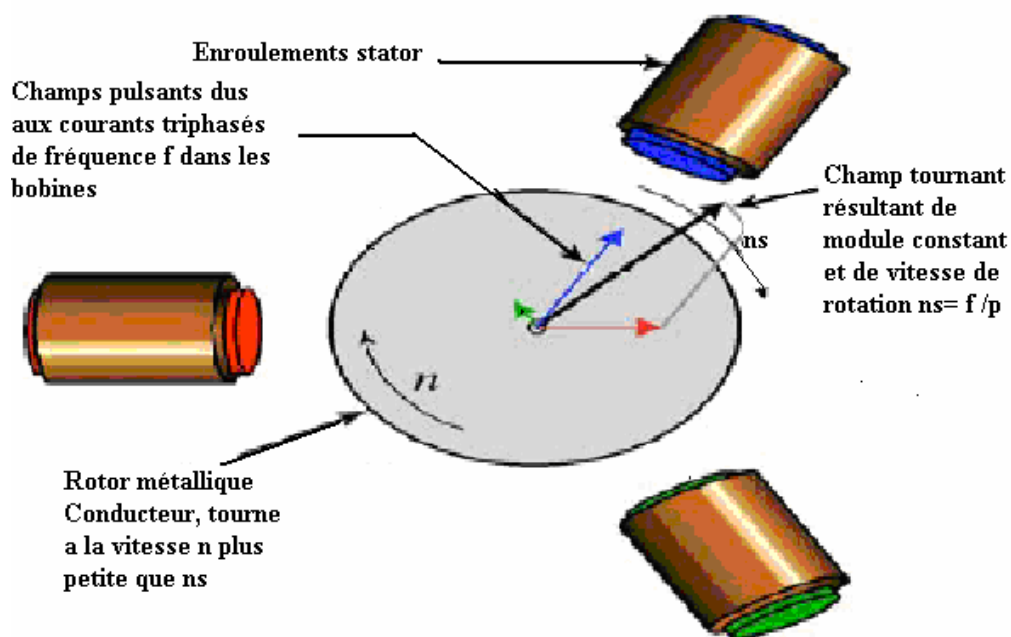
#### **1.2.6 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone**

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-à-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 (du champ magnétique). Une force électromotrice induite apparaît qui crée des courants rotorique. 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, [2].

Sur les moteurs asynchrones triphasés. Le champ tournant est produit par trois bobinages fixes géométriquement décalés de  $120^\circ$ , et parcourus par des courants alternatifs présentant le même décalage électrique. Les trois champs alternatifs qu'ils produisent se composent pour former un champ tournant d'amplitude constante comme il est présenté dans cette figure, [5].



**Fig.1.7** Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone

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 plus entraînée. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée vitesse de glissement.

Lorsqu'il est entraîné au-delà de la vitesse de synchronisme, la machine fonctionne en générateur alternatif. Mais son stator doit être forcément relié au réseau car lui seul peut créer le champ magnétique nécessaire pour faire apparaître les courants rotorique.

Un fonctionnement en générateur alternatif autonome est toutefois possible à l'aide de condensateurs connectés sur le stator, à condition qu'il existe un champ magnétique rémanent. On retrouve cette même problématique lorsqu'on cherche à faire fonctionner des machines à courant continu à excitation série en génératrice. À défaut, des dispositifs d'électronique de puissance et une batterie permettent d'amorcer le fonctionnement en génératrice autonome.

Cette solution est mise en œuvre pour produire de l'électricité à l'aide d'éoliennes dans des sites isolés, [2].

### 1.2.7 Glissement d'une machine asynchrone

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

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

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

➤ en 50 Hz c'est un sous multiple de 3000 tr/min soit : 3000 ; 1500 ; 1000 ; 750 ; etc.

➤ en 60 Hz c'est un sous multiple de 3600 tr/min, soit : 3600 ; 1800 ; 1200 ; 900 ; etc.

Soit  $p$  le nombre de paires de pôles de la machine et  $f$  la fréquence de l'alimentation. On a :

$$n_s = \frac{f}{p} \text{ en tr/s ou } n_s = \frac{60f}{p} \text{ en tr/min.} \quad (1,1)$$

Le glissement correspond à la différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique exprimée sous la forme d'un pourcentage de la vitesse de synchronisme.

$$n_s - n = g.n_s, \text{ soit } g = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1,2)$$

Le glissement est toujours faible, de l'ordre de quelques pour-cent : de 2 % pour les machines les plus grosses à 6 ou 7 % pour les petites machines triphasées, il peut atteindre 10 % pour les petites machines monophasées, [2].

### 1.2.8 Caractéristique de fonctionnement

#### 1.2.8.1 Fonctionnement à vide

A vide le moteur n'entraîne pas de charge, donc le glissement est nul est le moteur tourne à la vitesse de synchronisme, [5].

A vide  $g = 0 \Rightarrow n_0 = n_s$

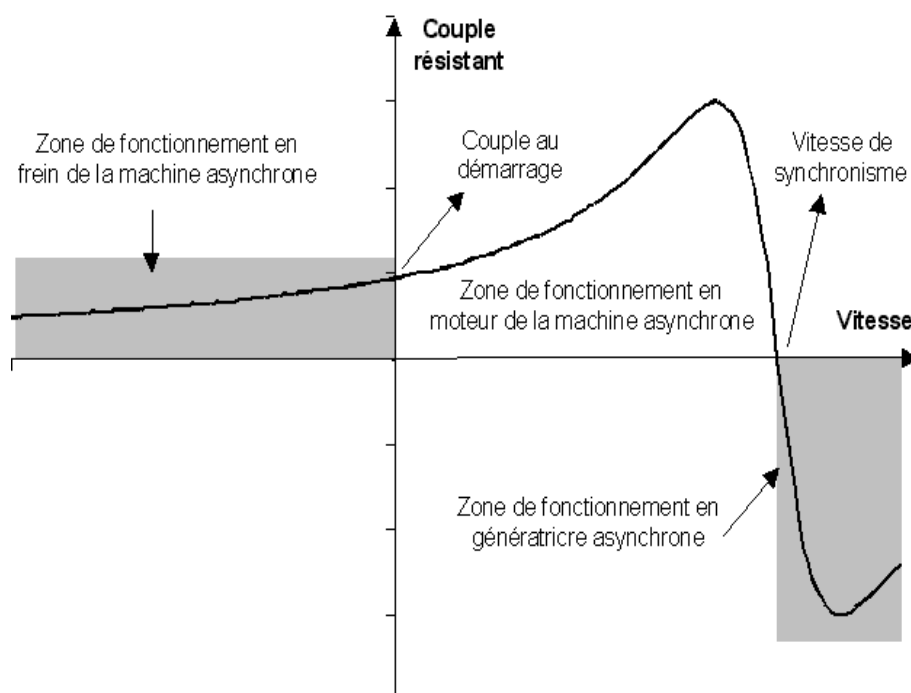
On peut observer aussi que le facteur de puissance à vide est très faible ( $\cos\phi < 0,2$ ) et le courant absorbé reste fort ( $P$  est petit et  $Q$  est grand). On parle alors de courant réactif ou magnétisant (ils servent à créer le champ magnétique).

### 1.2.8.2 Fonctionnement en charge

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

Il faut bien savoir que le moteur asynchrone est capable de démarrer en charge, [6].

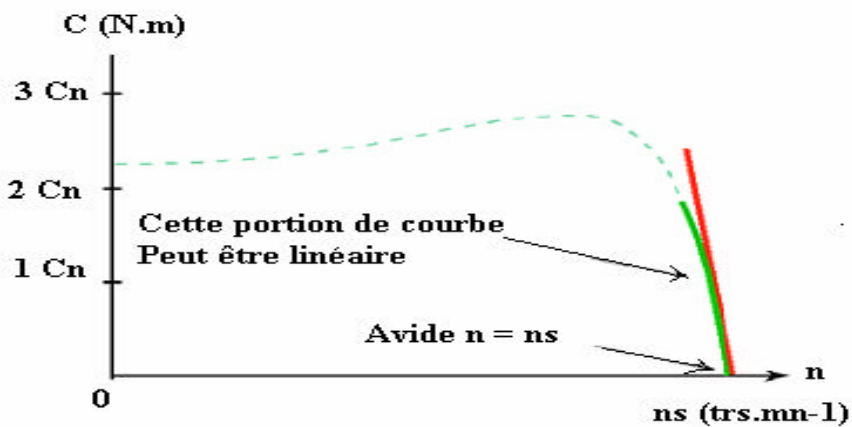
### 1.2.8.3 Les domaines de fonctionnement de la machine asynchrone



**Fig.1.8** Les trois domaines de fonctionnement de la machine asynchrone [2]

### 1.2.8.4 Caractéristique mécanique $C_u = f(n)$

C'est la courbe donnant le couple électromagnétique  $C$  en fonction de la vitesse  $n$ . C'est la caractéristique la plus importante puisque son intersection avec la caractéristique mécanique  $C_r(n)$  de la charge entraînée donne le point de fonctionnement, [7].



**Fig.1.9** Caractéristique mécanique

$C_n$  Couple nominale.

----- 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, [5].

### 1.2.8.5 Guide de sélection d'une machine asynchrone

Le choix d'un moteur asynchrone seul doit permettre l'entraînement de la machine accouplée avec les performances imposées par le cahier des charges à savoir :

- Le nombre de quadrants de fonctionnement
- Le couple sur toute la plage de vitesse : caractéristique  $C_r = f(\Omega)$
- La vitesse désirée
- L'accélération et la décélération souhaitées

Et le respect des normes pour le réseau d'alimentation énergétique :

- La puissance de démarrage disponible
- La consommation d'énergie réactive
- Le taux d'harmoniques imposé au réseau
- La compatibilité électromagnétique, [3].

### 1.2.9 Rendement

Le rendement d'un moteur asynchrone est le rapport de la puissance utile à la puissance absorbée.

$$\eta = P_u/P_a \quad (1, 3)$$

La puissance absorbée sous forme électrique est mesurée directement, mais la puissance mécanique est évaluée en déduisant les pertes calculées, et peut être obtenu directement ou indirectement, dans différents chemins. Dans le cas indirect qui constitue la tâche la plus difficile ou les pertes doivent être réparties, par une variété de méthodes normalisées. En effet, les pertes dans les machines tournantes peuvent être divisées en trois groupes principaux :

perdes électriques, pertes magnétiques de fer et pertes mécaniques, [4].

#### 1.2.9.1 Les Pertes dans les machines asynchrones

Les moteurs asynchrones ont les mêmes pertes que tous autres moteurs électriques, c'est-à-dire :

Les pertes mécaniques et les pertes complémentaires, pertes fer, pertes cuivre.

Les pertes principales sont celles qui sont dues aux principaux phénomènes électromagnétiques et mécaniques qui se manifestent lors du fonctionnement de la machine.

Ces pertes sont : les pertes principales dans le cuivre de l'enroulement statorique les pertes dans le fer, les pertes par frottement dans les paliers et par frottement des balais sur les bagues ainsi que les pertes par ventilation.

#### 1.2.9.2 Les pertes électriques

Ce sont les pertes par effet joule dans les enroulements d'induit, dans toutes les parties conductrices d'une machine traversées par des courants [8].

#### 1.2.9.3 Les pertes magnétiques de fer

Elles sont appelées aussi fer du fait que les matériaux utilisés pour ce circuit sont habituellement, à base de fer. Ces pertes regroupent les pertes par hystérésis et les pertes par courant de Foucault, [8].

##### 1.2.9.3.1 Les pertes par courant de Foucault

Dans ces alliages résultent, selon la loi de Faraday, des variations temporelles des flux qui induisent une force électromotrice, dans leurs masses. Ces f.é.m générés dans ces alliages conducteurs, de résistivité voisine de  $50 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ , donnent naissance à des courants qui se

ferment dans la masse du fer dans ces plans normaux à la direction du flux. Le phénomène est analogue à celui qui génère du courant 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 f.e.m.

On peut exprimer les pertes par courant de Foucault par la relation :

$$P_f = K_r (e.f.B_m^2) \quad (1,4)$$

Avec :

- $P_f$  Pertes par effet de Foucault
- $e$  Epaisseur de la tôle
- $f$  Fréquence de l'induction (Hz)
- $K_r$  Coefficient caractéristique de tôle, [8].

### 1.2.9.3.2 Les pertes par hystérésis

Résultent, sous l'effet de la variation en intensité et /ou en direction du champ magnétique appliqué, de transformation de l'organisation de la matière en domaines de Weiss dans lesquels l'aimantation est uniforme en direction et module, les moments magnétisation des atomes d'un domaine étant colinéaire. La variation de la magnétisation provoque des déplacements, des suppressions ou des créations des 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.

Les électrons concernés ici sont les électrons liés du matériau et le phénomène est totalement différent du précédent. Il est évident que ce phénomène d'hystérésis est discontinu à l'échelle microscopique des domaines. Mais, à l'échelle macroscopique de l'électrotechnique, les tôles les plus minces ayant encore une épaisseur de 50µm (soit environ  $10^3$  longueurs de domaines), [8].

On peut déterminer les pertes par hystérésis par l'expression :

$$P_h = K_h.f.B_m^2 \quad (1, 5)$$

Avec :

- $K_h$  Coefficient de pertes par hystérésis.

#### 1.2.9.4 Les pertes mécaniques

Les pertes mécaniques sont dues aux frottements :

- ✓ Dans les paliers ;
- ✓ Dans les roulements ;
- ✓ De l'air sur l'induit et sur le ventilateur destiné au refroidissement de la machine ;
- ✓ Pertes aérodynamiques.

Les pertes qui proviennent du frottement du rotor des organes fixes (paliers, balais) entraînent l'échauffement de la machine. Plus la machine tourne vite, plus que les pertes mécaniques deviennent importantes. Ces pertes dépendent de nombreuses facteurs et il est très difficile de prédire leur valeur. Pour les déterminer avec exactitude, il faut faire des essais sur la machine [8].

##### 1.2.9.4.1 Les pertes par ventilation

Elles représentent la puissance consommée par les moteurs d'actionnement des ventilateurs ou des pompes qui assurent la circulation du fluide dans le système de refroidissement. cette puissance est proportionnelle au débit  $Q$  du fluide, c'est à dire à sa quantité passant par le système de refroidissement par unité de temps et à la pression  $H$  développée par le ventilateur ou par de la pompe. Cette puissance est d'autant plus grande que le rendement  $\eta$  du ventilateur ou de pompe est plus faible.

Les pertes de puissance par ventilation sont déterminées lors du calcul hydraulique ou Thermique de la machine. Elles sont d'autant plus faibles que le système hydrodynamique de refroidissement est plus perfectionné et le choix du fluide de refroidissement est plus approprié. Sa valeur est plus petite pour les fluides liquides que pour les fluides gazeux, [8].

##### 1.2.9.4.2 Les 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 brifiés, 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.

L'expression suivante donne la somme des pertes par ventilation et par frottement aux paliers(en W) [8]

$$P_{v+p}=0,3 \text{ à } 0,7(P_u V_t^2 10^{-5}) \quad (1,6)$$

Avec :

$P_u$  (W) Puissance utile de la machine

$V_t$  (m/s) Vitesse tangentielle du rotor

#### 1.2.9.4.3 Les pertes par frottement dans les roulements

Les pertes mécaniques, dues aux frottements 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, [8].

#### 1.2.9.4.4 Les 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, [8].

#### 1.2.9.4.5 Les pertes complémentaires

Elles forment un groupe de pertes spéciales, se sont :

- ✓ Les pertes complémentaires dans le cuivre
- ✓ Les pertes complémentaires dans le fer.

Pour une tension sinusoïdale aux bornes du moteur, les pertes complémentaires dans le cuivre prennent naissance partiellement sous l'influence des harmoniques supérieurs de la F.M.M et Partiellement sous l'effet de déplacement du courant.

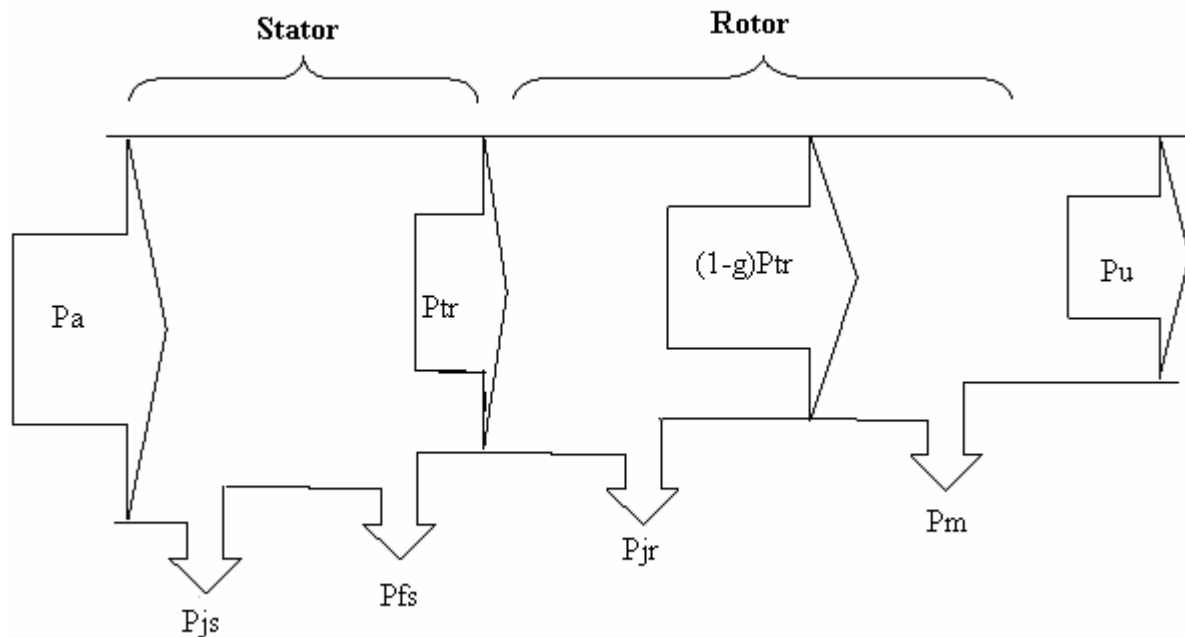
Les pertes complémentaires dans le cuivre dues aux harmoniques supérieurs de la F.M.M.elles ont lieu surtout dans les enroulements d'un rotor à cage d'écureuil. Lorsque le rotor tourne dans les champs magnétiques créés par les harmoniques supérieurs de la F.M.M du stator, des courants prennent naissance dans l'enroulement rotorique dont la fréquence dépend du glissement et la fréquence du champ tournant. Pour réduire ces pertes on raccourcit le pas d'enroulement du stator, ce qui provoque une diminution des harmoniques supérieures de la F.M.M. l'inclinaison des encoches du rotor par rapport à celles du stator joue le même rôle que le raccourcissement du pas, et on choisit convenablement le nombre d'encoches dans le stator et dans le rotor  $Z_1$  et  $Z_2$ .

L'analyse montre que si les pertes complémentaires dans le rotor ne doivent pas dépasser 10% des pertes principales provoquées par le premier harmonique du courant, avec des encoches non inclinées  $Z_2 \leq 4/3 Z_1$ .

Les pertes complémentaires dans le fer des machines asynchrones comme dans le cas des machines synchrones, comprennent les pertes de pulsation et les pertes superficielles.

Les pertes de pulsation sont provoquées par les pulsations longitudinales du flux magnétique par suite de la variation de la perméance provoquée par la variation continue de la position Relative des dents du stator et du rotor lors de la rotation de ce dernier. La fréquence de pulsation dans le stator  $f_{a1} = Z_2 n$  et la fréquence de pulsations dans le rotor  $f_{a2} = Z_1 n$ , ou  $Z_1$  et  $Z_2$  sont respectivement les nombres d'encoches dans le stator et le rotor,  $n$  est la vitesse de rotation du rotor [4],

### 1.2.10 Bilan des puissances du moteur



**Fig.1.10** Bilan des puissances

Le moteur absorbe du réseau la puissance :

$$P_a = 3V J \cos \alpha = 3U I \cos \alpha \quad (1,3)$$

Une partie de cette puissance (1 à 2 %) est perdue dans le stator sous forme de pertes dans le fer ( $P_{fs}$ ) et de pertes dans le cuivre dues à l'effet joule ( $P_{js}$ ).

La puissance restante est, alors transmise au rotor par le champ tournant sous la forme de puissance électromagnétique :

$$P_{tr} = P_a - (P_{js} + P_{fs}) \quad (1,4)$$

Le rotor utilise cette puissance à deux fins :

Une partie est gaspillée par l'effet joule dans les enroulements du rotor (résistance propre rhéostat extérieur si celui-ci n'est pas en court circuit), l'autre partie se trouve en puissance mécanique  $P_M$  disponible sur l'arbre de moteur, tel que :  $P_M = (1 - g) P_{tr}$

On peut vérifier que  $P_{jr} = g \cdot P_{tr}$ , d'où  $P_u = (1 - g) P_{tr} - P_{jr}$  si l'on néglige  $P_{tr}$ , [2].

## **1.3 Conception assistée par micro-ordinateur**

La recherche actuelle est orientée des nouvelles techniques, parmi les quelles nous avons pris une technique demandé de plus en plus d'importance dans l'industrie, c'est la conception assistée par ordinateur (CAO), cette dernière a été adoptée et confondue à partir les français ; Généralement l'existence de l'être humain dans l'industrie exige l'ingénieur comme un cœur de cet objet son oubliant la machine de production et l'ordinateur.

On peut aussi dire, la conception assistée par ordinateur est un ensemble d'actions bien définies pour donner des solutions exactes à partir d'un processus itératif à condition dans une durée limitée et rapide.

### **1.3.1 Définition**

#### **1.3.1.1 la conception**

La conception est un exercice plutôt futile, et nous avons préfère 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.

On identifie plusieurs étapes dans cette démarche :

- ✓ Création d'un modèle de l'objet ;
- ✓ Analyse, essais et simulation ;
- ✓ Construction de prototypes ;
- ✓ Modification ;
- ✓ Réalisation de l'objet.

A quelques variantes près dans l'enchaînement de ces étapes, la méthodologie est la même que l'objet, soit un circuit électrique, une pièce mécanique.

Autres caractéristiques communes à l'ensemble des activités de conception sont les moyens ou médias utilisés par le concepteur, [9].

### **1.3.1.2 La conception assistée**

A mesure que l'envergure et la complexité des projets augmentent, chacune des étapes et des moyens mis en œuvre deviennent plus élaborés et nécessitent une certaine spécialisation. Ainsi le concepteur ne peut plus communiquer avec un technicien à l'aide d'un dessin fait rapidement à main levée au-delà du stade préliminaire. La réalisation des pièces est telle que beaucoup d'informations doivent être transmises de façon complète et non équivoque.

Donc à chacune des étapes, le concepteur fait appel à des "intermédiaires" qui restreignent, ralentissent et augmentent le temps et le coût d'un design. On atteint donc le point où la coordination de ces activités dépasse la capacité d'un seul cerveau, et ceci en grande partie à cause de certaines fonctions secondaires à caractère non créatif. Heureusement, ces fonctions sont de nature quantitatives et peuvent être confiées à des auxiliaires (dessinateurs, programmeurs) et libérer le concepteur pour les tâches qualitatives qui sont du niveau de ses aptitudes et de sa formation. On atteint ainsi la conception assistée dont la nature n'a pas changé. Seulement certaines modalités ont été modifiées, [9].

### **1.3.1.3 La conception assistée par ordinateur**

Les exigences technologiques donnent lieu à des projets complexes et qui résultent en un morcellement du travail. L'industrie se trouve vis-à-vis ses travailleurs intellectuels dans la même situation qu'au début du siècle avec les travailleurs manuels. Le pari des entreprises est que la CAO permettra une hausse semblable de la productivité des ingénieurs.

Les progrès dans le domaine de l'électronique mettent à la disposition de l'ingénieur une puissance de calcul, de mémoire et de traitement énorme et ceci bon marché. D'autre part, la création de logiciels extrêmement évolués permet d'informatiser de nombreuses tâches quantitatives du processus de conception tout en libérant l'esprit utilisant au mieux les qualités de l'homme et de l'ordinateur. La façon dont le cerveau humain combine des données et fait appel à des ressources en fonction certains objectifs sont complexes et loin d'être clairs. La réalisation de cet objectif constitue un des domaines d'avenir et sa maîtrise sera l'équivalent de la révolution industrielle pour le travail intellectuel.

On utilise la capacité de calcul de stockage et de traitement de l'ordinateur, alliés aux capacités de reconnaissances de formes, d'évaluation, de jugement de situation complexe (conflituelles) et les possibilités de l'intuition de l'humain pour imaginer de nouvelles solutions, [9].

### **1.3.2 Avantages**

Sous l'effet de fortes pressions provenant de la compétition, de la conjoncture économique de diverses contraires du public et des organismes gouvernementaux pour de meilleurs produits (et à meilleur marché), l'industrie est forcée de hausser la productivité du personnel technique. Il est vite apparu qu'à l'aide de l'informatique, des économies appréciables sont possibles pour chacune des différentes phases du processus de design.

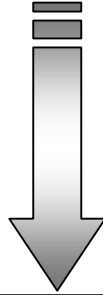
- Création d'un modèle ;
- Analyse ;
- Modification.

## **1.4 Conclusion**

La machine asynchrone fait actuellement l'objet d'un intérêt accru dans plusieurs applications ce qui est 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 dépendent à la fois du courant statoriques, ce qui donne à la machine son caractère de processus multi- variable et non linéaire.

Il est évident 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 complets de manière à ce que le comportement d'éléments tels que les poutres peut être analysé avec beaucoup plus de fiabilité et de détails qu'avec les formules empiriques utilisées auparavant.

# CHAPITRE 02



PRINCIPE DES  
ALGORITHMES  
GÉNÉTIQUES

## 2.1 Introduction

Parmi les problèmes rencontrés par le chercheur et l'ingénieur, les problèmes d'optimisation occupent à notre époque une place de choix.

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et des mécanismes d'évolution de la nature : croisements, mutations, sélections, etc.. Ils appartiennent à la classe des algorithmes évolutionnaires.

Il arrive très souvent que les sciences et les techniques imitent les mécanismes de la nature. Par exemple, le sonar ou le radar sont inspirés des techniques d'écholocation des dauphins ou des chauve-souris, la texture de la peau de requin a été imitée pour fabriquer des matériaux hydrodynamiques... Les algorithmes génétiques (AG) proposent de reproduire les mécanismes d'évolution et d'adaptation génétique de la vie pour optimiser des problèmes complexes dont les données peuvent varier au cours du temps. La vie a besoin en permanence de s'adapter : à un nouvel environnement, à un nouveau prédateur, ou à de nouvelles proies. Le vocabulaire et les intuitions des algorithmes génétiques appartiennent en partie au vocabulaire et aux intuitions de la biologie. Ces algorithmes fabriquent des chromosomes qui codent chacun une solution potentielle à un problème donné. A chaque étape (appelée génération), ces chromosomes se combinent, mutent, et sont sélectionnés en fonction de leur qualité à répondre au problème. De même, dans la nature, selon la thèse darwinienne, seule la succession de croisements et de mutations aléatoires suffit à expliquer l'adaptation des êtres vivants à leur milieu nature (problème qui serait trop complexe à comprendre dans son ensemble). Dans les AG, la succession des croisements et des mutations permet d'arriver à une solution, qui sans être nécessairement optimale, peut être très satisfaisante. .

L'AG peut être utilisé à tous les stades : recherche, développement, production. En effet, il est tout aussi nécessaire de concevoir un dispositif ayant des caractéristiques optimales, qu'un dispositif ayant une faisabilité optimale, un coût optimal... Ils constituent un domaine de recherche très actif, d'une part de par leur intérêt propre, d'autre part parce qu'ils rejoignent les enjeux industriel et économique actuels.

Malheureusement, les ordinateurs de l'époque n'étaient pas assez puissants pour envisager l'utilisation des algorithmes génétiques sur des problèmes réels de grande taille. L'ouvrage de Goldberg qui décrit l'utilisation des algorithmes génétiques dans le cadre de résolution de problèmes concrets a permis de mieux faire connaître ces derniers et a marqué le début d'un nouvel intérêt pour ces techniques, [10, 11].

Le but de ce chapitre est de présenter le principe de la méthode d'optimisation basé sur les algorithmes génétiques, ses applications ainsi que les différentes étapes nécessaires à ses développements, pour en finir avec la recherche de la solution optimale d'une fonction simple afin de faciliter la compréhension de ces algorithmes.

## **2. 2 Historique**

En 1860 Charles Darwin publie son livre intitulé L'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle ou la lutte pour l'existence dans la nature. Dans ce livre, Darwin rejette l'existence «de systèmes naturels figés», déjà adaptés pour toujours à toutes les conditions extérieures, et expose sa théorie de l'évolution des espèces : sous l'influence des contraintes extérieures, les êtres vivants se sont graduellement adaptés à leur milieu naturel au travers de processus de reproductions.

20<sup>ième</sup> siècle : Mise en évidence de l'existence de mutations génétiques. Les problèmes de traitement de l'information sont résolus de manières figés : lors de sa phase de conception, le système reçoit toutes les caractéristiques nécessaires pour les conditions d'exploitations connues au moment de sa conception ce qui empêche une adaptation à des conditions d'environnement inconnues, variables ou évolutives. Les chercheurs en informatique étudient donc des méthodes pour permettent aux systèmes d'évoluer spontanément en fonction de nouvelles conditions.

1966 : Programmation évolutionnaire L. J. Fogel.

1973 : Stratégie d'évolution I. Rechenberg.

Dans les années 1960, John Holland étudie les systèmes évolutifs et, en 1975, il introduit le premier modèle formel des algorithmes génétiques (the canonical genetic algorithm AGC) dans son livre *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ce modèle servira de base aux recherches ultérieures.

En 1989, David Goldberg publie un ouvrage de vulgarisation des algorithmes génétiques.

Années 1990 : Programmation d'une panoplie d'algorithmes génétiques transcrits en C++, appelée GALib. Cette librairie contient des outils pour des problèmes d'optimisation en utilisant les AG. Elle est conçue pour servir de support de programmation, [10].

## **2.3 Définition des algorithmes génétiques**

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes évolutionnistes d'optimisation qui recherchent le ou les extrêmes d'une fonction définie sur un intervalle de données. Fondés sur

la théorie de l'évolution de Darwin et sur les lois de la génétique. Ces algorithmes fonctionnent (évoluent) de la façon dont peut évoluer une population en passant par les mêmes étapes : sélection, croisement et mutation.

En se basant sur les informations délivrées par la fonction à optimiser, les algorithmes génétiques contrairement aux autres méthodes explorent plusieurs points de l'espace (population). A chaque génération seul les points qui correspondent aux valeurs les plus élevées de la fonction à optimiser seront sélectionnés. Ils engendreront suite au croisement et la mutation de nouveaux points (une nouvelle population). A chaque génération, un optimum est calculé, [12].

## 2.4 Vocabulaire utilisé par les algorithmes génétiques

Avant d'entrer plus avant dans la description d'un AG il est utile d'introduire le vocabulaire que nous allons utiliser:

### ➤ **individu, organisme**

un organisme biologique est plus qu'un génome, c'est aussi une forme, un phénotype qui est le produit de l'activité des gènes. Dans le cadre d'un AG traditionnel, l'individu est réduit à son génome, à un ensemble de caractéristiques élémentaires.

### ➤ **chromosome**

Un AG classique traite des individus constitués d'une seule séquence de gènes, un chromosome, alors que les organismes biologiques peuvent en avoir plusieurs. L'approche informatique idéalise traditionnellement le chromosome en le réduisant à un vecteur de gènes alors que la molécule d'ADN possède une configuration dans l'espace (ou structure tertiaire) qui évolue dynamiquement et conditionne l'activation des gènes.

### ➤ **gène**

Caractéristique d'une solution au problème que l'AG traite. Il faut noter que lorsque qu'on parle d'organisme vivant, un gène est souvent plus qu'un objet atomique. Un gène peut être un complexe de séquences génétiques qui coopèrent pour assurer une fonction. Par exemple, un tel complexe (ou opéron) peut regrouper des séquences qui codent une protéine et d'autres qui en assurent la régulation.

### ➤ **locus**

Signifie lieu en latin. Le locus est la position du gène dans le chromosome. Ce terme vaut pour l'AG aussi bien que pour les systèmes biologiques.

➤ **allèle**

Symbole attaché à un gène. Alors que l'alphabet du code génétique naturel est composé des quatre lettres ATCG nous pouvons choisir n'importe quel alphabet pour un AG. Toutefois pour des raisons explicitées en section , un alphabet binaire est couramment utilisé.

➤ **population**

Un groupe d'organismes artificiels ou naturels, [10].

## **2.5 Application des algorithmes génétiques**

Les applications des AG sont multiples : optimisation de fonctions numériques difficiles (discontinues, multimodales, bruitées...), traitement d'image (alignement de photos satellites, reconnaissance de suspects...), optimisation d'emplois du temps, optimisation de design, contrôle de systèmes industriels [Beasley, 1993], apprentissage des réseaux de neurones [Renders, 1995], etc. Les AG peuvent être utilisés pour contrôler un système évoluant dans le temps (chaîne de production, centrale nucléaire...) car la population peut s'adapter à des conditions changeantes. En particulier, ils supportent bien l'existence de bruit dans la fonction à optimiser. Ils peuvent aussi servir à déterminer la configuration d'énergie minimale d'une molécule ou à modéliser le comportement animal.

Les AG sont également utilisés pour optimiser des réseaux (câbles, fibres optiques, mais aussi eau, gaz...), des antennes [Reineix, 1997]... Ils peuvent être utilisés pour trouver les paramètres d'un modèle petit-signal à partir des mesures expérimentales [Menozzi, 1997]. Des commutateurs optiques adiabatiques ont été optimisés à l'aide des Stratégies d'Evolution. On envisage l'intégration d'AG dans certaines puces électroniques afin qu'elles soient capables de se reconfigurer automatiquement en fonction de leur environnement, [10].

## **2.6 Différence fondamentale entre AG et autres méthodes**

- Les algorithmes génétiques utilisent un codage des paramètres, et non les paramètres eux-mêmes.
- Les algorithmes génétiques travaillent sur une population de points, au lieu d'un point unique.
- Les algorithmes génétiques n'utilisent que les valeurs de la fonction étudiée, pas sa dérivée, ou une autre connaissance auxiliaire.

- Les algorithmes génétiques utilisent des règles de transition probabilistes, et non déterministes.

## 2.7 Principe

Les algorithmes génétiques sont des procédures qui s'inspirent des mécanismes de sélection naturelle et des phénomènes génétiques. Le principe de base consiste à simuler le processus d'évolution naturelle dans un environnement hostile. Ces algorithmes utilisent un vocabulaire similaire à celui de la génétique, cependant, les processus auxquels ils font référence sont beaucoup plus complexes.

On parlera ainsi d'individu dans une population. L'individu est composé d'un ou plusieurs chromosomes. Les chromosomes sont eux-mêmes constitués de gènes qui contiennent les caractères héréditaires de l'individu. Les principes de sélection, de croisement, de mutation introduite dans ce cadre artificiel, s'appuient sur les processus naturels du même nom.

Pour un problème d'optimisation donné, un individu représente un point de l'espace d'état. On lui associe la valeur du critère à optimiser. L'algorithme génère ensuite de façon itérative des populations d'individus sur lesquelles on applique des processus de sélection, de croisement et de mutation. La sélection a pour but de favoriser les meilleurs éléments de la population, tandis que le croisement et la mutation assurent une exploration efficace de l'espace d'état, [10].

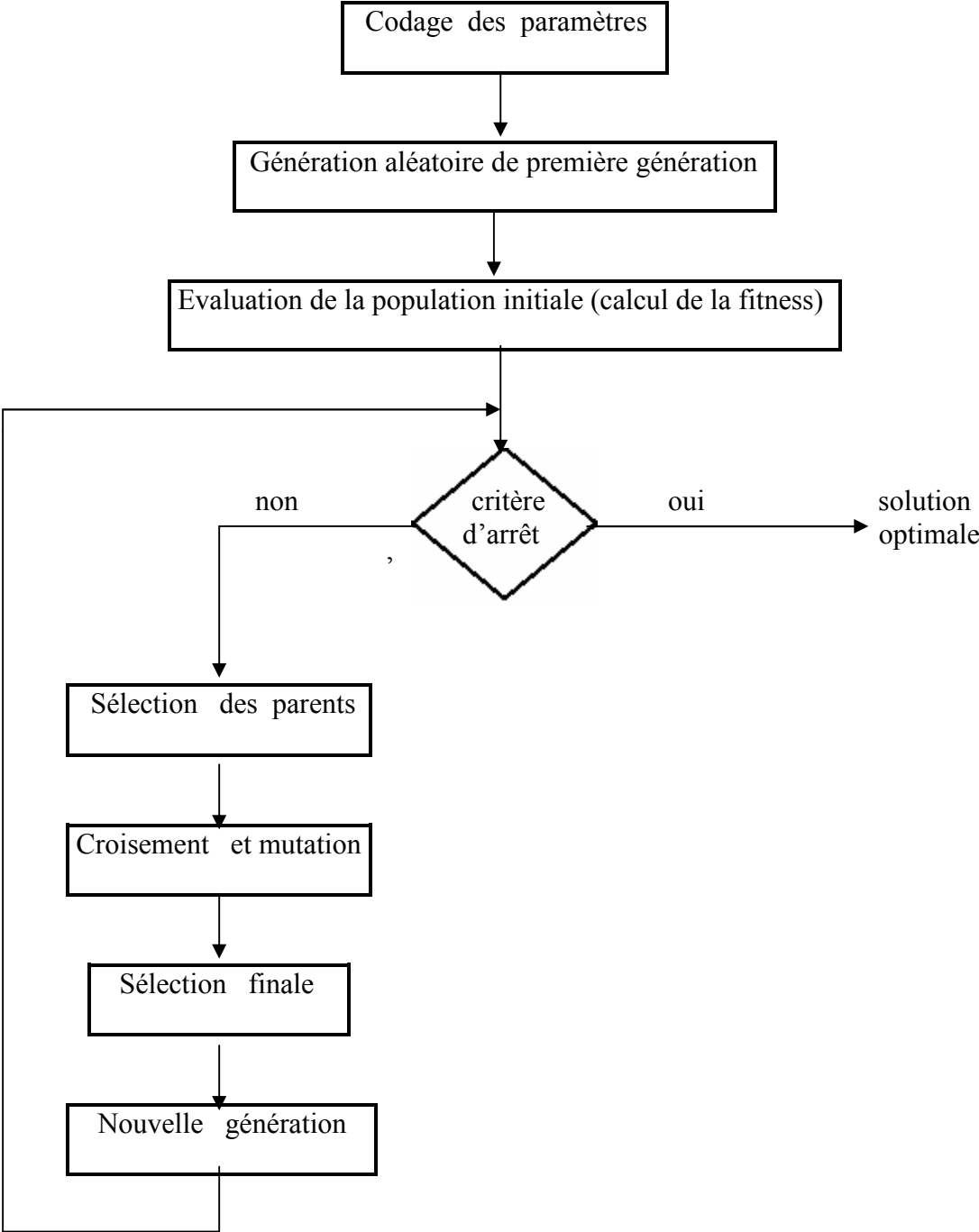
### 2.7.1 Principes généraux des fonctionnements

Une description abstraite de l'AG de base peut se faire selon les étapes suivantes:

- Initialiser aléatoirement une population de chromosome (individus).
- Evaluer chaque chromosome qui est associé à une fonction coût ou fonction d'aptitude déterminant son rang dans la population. Cette fonction est l'arbitre final décidant la vie ou la mort de chaque individu.
- Créer de nouveaux chromosomes en appliquant les opérateurs de la sélection et de la reproduction.
- Evaluer les nouveaux chromosomes (les descendants) et les insérer dans la population pour construire une nouvelle génération.

Ce processus se répète jusqu'à la satisfaction du critère d'AG qui est généralement spécifié par un nombre de générations, [13].

Cet algorithme est schématisé par l'organigramme représenté par la figure (2.1) .



**Fig.2.1** Organigramme de l'algorithme génétique.

## 2.8 Description détaillée

### 2.8.1 Le codage

Le premier pas dans l'implantation des algorithmes génétiques est de créer une population d'individus initiaux. En effet, les algorithmes génétiques agissent sur une population d'individus, et non pas sur un individu isolé. Par analogie avec la biologie, chaque individu de la population est codé par un chromosome. Une population est donc un ensemble de chromosomes. Chaque chromosome code un point de l'espace de recherche. L'efficacité de l'algorithme génétique va donc dépendre du choix du codage d'un chromosome.

Historiquement le codage utilisé par les algorithmes génétiques était représenté sous forme de chaînes de bits contenant toute l'information nécessaire à la description d'un point dans l'espace ce qui permettait des opérateurs de mutations et de croisements simple.

Il y a plusieurs formes de codage (codage réel, codage de gray ...), on note : les différents type de codage, [10, 14].

#### 2.8.1.1 codage binaire

Un gène est un entier long (32 bits), un chromosome est un tableau de gène....

L'avantage du codage binaire est que l'on peut facilement coder toutes sortes de variable : des réels, des entiers, des valeurs booléennes, des chaînes de caractères....

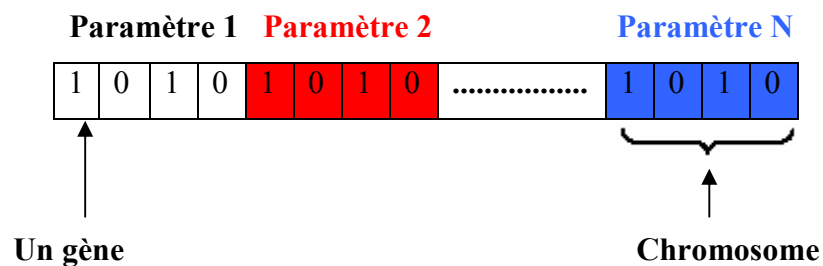


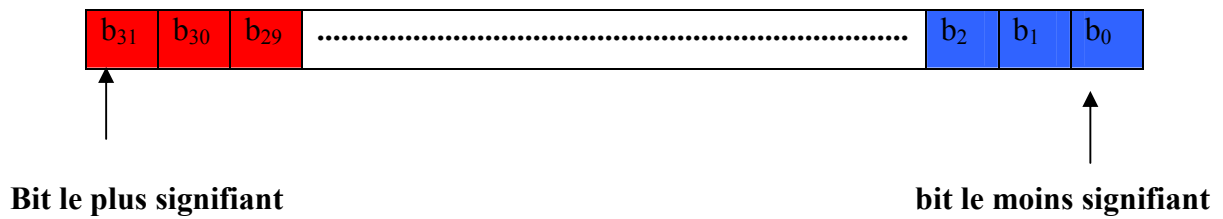
Fig.2.2 Codage binaire des données.

Dans certains algorithmes d'optimisation, tels que les stratégies évolutionnaires, l'espace de recherche est infini : seule la population initiale est confinée dans un espace fini, mais dans le cas des AG, il est généralement nécessaire de définir un espace de recherche fini. En effet, cette limitation ne serait que pour des raisons informatiques, les intervalles de définition des variables sont en général naturellement limités comme suit, [10, 15].

$$x_i \min \leq x_i \leq x_i \max \quad \forall i \in [1, n]$$

Afin de coder nos variables réelles en binaire (un code sur 32 bits), nous discrétisons l'espace

de recherche  $g_{\max} = 2^{32} - 1 = 4294967295$  valeurs discrètes.



**Fig.2.3** Code sur 32 bits

A chaque variable réelle  $X_i$ , on associe donc entier long  $G_i$  :

$$0 \leq g_i \leq g_{\max} ; \forall i \in [1, n]$$

Les formules de codage et décodage sont alors suivantes :

$$g_i = \frac{x_i - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}} g_{\max} \quad (2,1)$$

$$x_i = x_{i\min} + \frac{(x_{i\max} - x_{i\min})}{g_{\max}} g_i \quad (2,2)$$

### 2.8.1.2 codage par valeurs réelles :

C'est grâce au codage binaire que les premiers résultats de convergence ont été obtenus. Mais ce procédé connaît ses limites dans les problèmes de grandes dimensions car chaque point est représenté par une partie de la chaîne mais le problème n'est pas reflété. L'ordre de variable étant important pour un chromosome ne l'est pas pour le problème.

Pour éviter cet inconvénient, les algorithmes génétiques utilisent le codage par vecteur réel, ce procédé permet de conserver les variables du problème dans le codage et cela, sans passer par le codage binaire, [14].

#### Chromosome A

A	A	C	G	T	T	C	G
---	---	---	---	---	---	---	---

#### Chromosome B

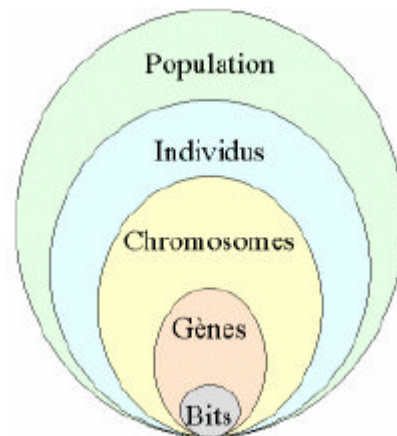
2.34	5.67	0.50	0.34	1.87	5.78	3.67	9.12
------	------	------	------	------	------	------	------

#### Chromosome C

Bleu	Rouge	Vert	Bleu	Bleu	Rouge	Rouge	Noir
------	-------	------	------	------	-------	-------	------

**Fig.2.4** Codage par valeurs réelles

On aboutit à une structure présentant cinq niveaux d'organisation (figure 2.5), d'où résulte-le comportement complexe des AG, [10].



**Fig.2.5** Les cinq niveaux d'organisation de notre Algorithme Génétique.

### **2.8.2 Génération aléatoire de la population initiale**

Comme dans tout problème d'optimisation, une connaissance de ``bons" points de départ conditionne la rapidité de la convergence vers l'optimum.

Si la position de l'optimum dans l'espace d'état est totalement inconnue, il est naturel de générer aléatoirement des individus en faisant des tirages uniformes dans chacun des domaines associés aux composantes de l'espace d'état, en veillant à ce que les individus produits respectent les contraintes.

Si par contre, des informations a priori sur le problème sont disponibles, il paraît bien évidemment naturel de générer les individus dans un sous-domaine particulier afin d'accélérer la convergence.

Une nouvelle fois, les contraintes du problème pourront être incorporées (ou non) dans le tirage de la génération initiale.

Disposant d'une population d'individus non homogène, la diversité de la population doit être entretenue au cours des générations afin de parcourir le plus largement possible l'espace d'état, c'est le rôle des opérateurs de croisement et de mutation. Toutefois cette méthode diffère de la méthode de recherche aléatoire, puisque les générations successives doivent être évaluées et modifiées afin de converger, [10, 14].

### **2.8.3 Evaluation**

L'évaluation de chaque dispositif est réalisée par le modèle utilisé. Si le dispositif possède plusieurs états de fonctionnement, le modèle peut être lancé plusieurs fois. Les résultats obtenus sont alors utilisés pour calculer les fonctions objectif et la fonction d'adaptation.

Notons que dans le cas d'un modèle physique, la majeure partie du temps de calcul sera probablement due à l'exécution de ce modèle. En effet, le reste de l'AG est essentiellement composé de manipulation d'entiers et de bits, donc très rapide, [10].

### **2.8.2 Fonction objective et fonction fitness**

On appelle fonction objective, la fonction qu'on souhaite optimiser. Pour calculer le coût d'un point de l'espace de recherche, on utilise une fonction d'évaluation ou fonction objectif. L'évaluation d'un individu ne dépend pas de celle des autres individus, le résultat fourni par la fonction d'évaluation va permettre de sélectionner ou de refuser un individu pour ne garder que les individus ayant le meilleur coût en fonction de la population courante : c'est le rôle de la fonction fitness. Cette méthode permet de s'assurer que les individus performants seront conservés, alors que les individus peu adaptés seront progressivement éliminés de la population.

La fonction fitness est déterminée selon le problème posé (à optimiser). Dans le cadre d'une simple optimisation de fonction, la fonction fitness est la fonction objective.

La fitness peut être envisagée comme étant une mesure de profit, d'utilité ou de qualité. Elle sert à attribuer à un individu une valeur numérique en rapport avec l'intérêt qu'il représente en tant que solution.

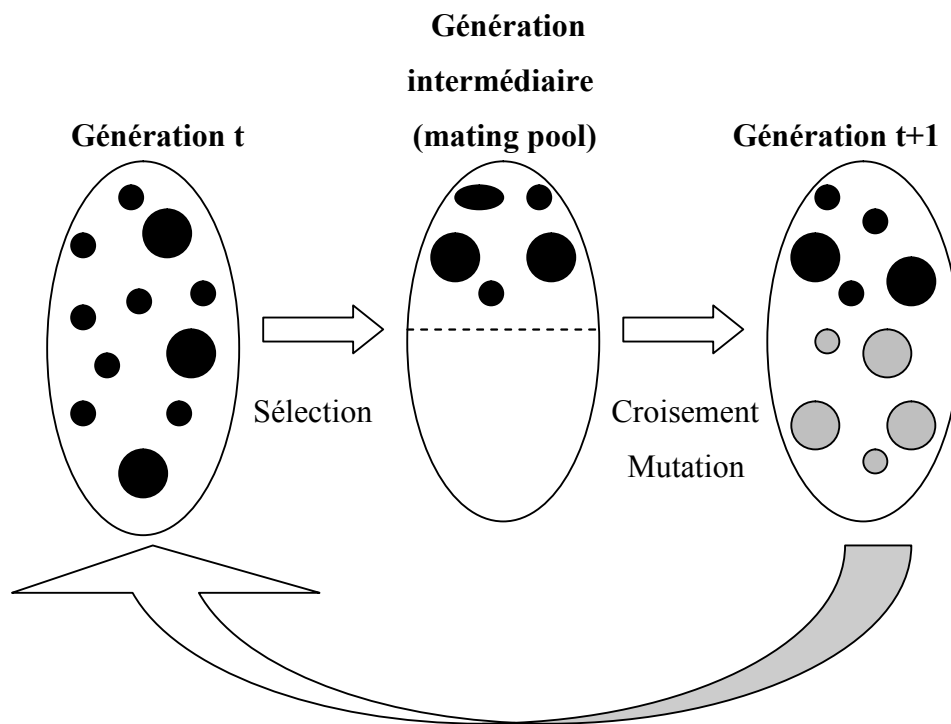
Les individus d'une population seront sélectionnés ou éliminés en fonction de leur fitness. Seul les individus dont la fitness est élevée seront reproduits, [10, 12].

### **2.8.3 Sélection**

La sélection permet d'identifier statistiquement les meilleurs individus d'une population et d'éliminer les mauvais, [12].

Nous appelons génération la population à un instant  $t$  donné. Une fois réalisée l'évaluation de la génération, on opère une sélection à partir de la fonction d'adaptation. Seuls les individus passant l'épreuve de sélection (rappelons qu'il ne s'agit ici que de dispositifs !) peuvent accéder à la génération intermédiaire (mating pool en terminologie anglo-saxonne) et s'y reproduire. En fait, cette génération intermédiaire est deux fois plus petite que la génération dont elle est issue (figure 2.6), [10].

Notre algorithme étant conçu de façon à ce que chaque couple d'individus parents donne naissance à deux enfants, nous aboutissons à nouveau à une génération entière à l'instant  $t+1$ .

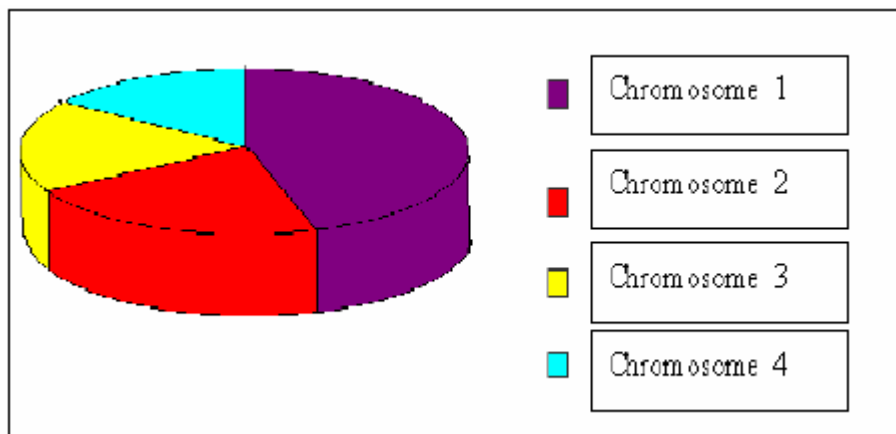


**Fig.2.6** Représentation schématique du fonctionnement de notre algorithme.

Il existe plusieurs méthodes de sélection :

### 2.8.3.1 Sélection par roulette (wheel)

Les parents sont sélectionnés en fonction de leur performance. Meilleur est le résultat codé par un chromosome, plus grandes sont ses chances d'être sélectionné. Il faut imaginer une sorte de roulette de casino sur laquelle sont placés tous les chromosomes de la population, la place accordée à chacun des chromosomes étant en relation avec sa valeur d'adaptation. Cette roulette est représentée par la figure (2.7), [10].



**Fig.2.7** Sélection par roulette

Ensuite, la bille est lancée et s'arrête sur un chromosome. Les meilleurs chromosomes peuvent ainsi être tirés plusieurs fois et les plus mauvais ne jamais être sélectionnés. Cela peut être simulé par l'algorithme suivant :

- On calcule la somme  $S_1$  de toutes les fonctions d'évaluation d'une population.
- On génère un nombre  $\tau$  entre  $0$  et  $S_1$ .
- On calcule ensuite une somme  $S_2$  des évaluations en s'arrêtant dès qu'est dépassé.
- Le dernier chromosome dont la fonction d'évaluation vient d'être ajoutée est sélectionné, [10].

### 2.8.5.2 Sélection par rang

La sélection précédente rencontre des problèmes lorsque la valeur d'adaptation des chromosomes varie énormément. Si la meilleure fonction d'évaluation d'un chromosome représente **90%** de la roulette alors les autres chromosomes auront très peu de chance d'être sélectionnés et on arriverait à une stagnation de l'évolution.

La sélection par rang trie d'abord la population par fitness. Ensuite, chaque chromosome se voit associé un rang en fonction de sa position. Ainsi le plus mauvais chromosome aura le rang **1**, le suivant **2**, et ainsi de suite jusqu'au meilleur chromosome qui aura le rang **N** (pour une population de **N** chromosomes). La sélection par rang d'un chromosome est la même que par roulette, mais les proportions sont en relation avec le rang plutôt qu'avec la valeur de l'évaluation. Le tableau ci dessous fournit un exemple de sélection par rang. Avec cette méthode de sélection, tous les chromosomes ont une chance d'être sélectionnés. Cependant, elle conduit à une convergence plus lente vers la bonne solution. Ceci est dû au fait que les meilleurs chromosomes ne diffèrent pas énormément des plus mauvais, [10].

Chromosomes	1	2	3	4	5	6	Total
Probabilités initiales	89 %	5 %	1 %	4 %	3 %	2 %	100 %
Rang	6	5	1	4	3	2	21
Probabilités finales	29 %	24 %	5 %	19 %	14 %	9 %	100 %

**Fig.2.8** Exemples de sélection par rang pour 6 chromosomes.

### 2.8.5.3 Sélection steady-state

Ce n'est pas une méthode particulière de sélection des chromosomes parents. L'idée principale est qu'une grande partie de la population puisse survivre à la prochaine génération.

L'algorithme génétique marche alors de la manière suivante. A chaque génération sont sélectionnés quelques chromosomes (parmi ceux qui ont le meilleur coût) pour créer des chromosomes fils. Ensuite les chromosomes les plus mauvais sont retirés et remplacés par les nouveaux. Le reste de la population survie à la nouvelle génération, [10].

### **2.8.5.3 Elitisme**

Les individus sont triés selon leur fonction d'adaptation. Seule la moitié supérieure de la population, correspondant aux meilleurs composants, est sélectionnée. Nous avons pu constater que cette méthode induisait une convergence prématurée de l'algorithme : la pression de sélection est trop forte. Il est en effet nécessaire de maintenir une diversité génétique suffisante dans la population, celle-ci constituant un réservoir de gènes pouvant être utiles par la suite. En effet, tout individu peut transmettre à sa descendance des gènes (paramètres de composant) qui, une fois combinés avec d'autres, peuvent se révéler intéressants. Nous avons donc essayé la méthode suivante, [10].

### **2.8.5.4 Sélection par tournoi**

Deux individus sont choisis au hasard et combattent (on compare leurs fonctions d'adaptation) pour accéder à la génération intermédiaire. Le plus adapté l'emporte avec une probabilité, que nous avons généralement prise égale à 1 (une valeur inférieure permet de réduire la pression de sélection si nécessaire). Cette étape est répétée jusqu'à ce que la génération intermédiaire soit remplie ( $N/2$  composants). Il est tout à fait possible que certains individus participent à plusieurs tournois : s'ils gagnent plusieurs fois, ils auront donc droit d'être copiés plusieurs fois dans la génération intermédiaire, ce qui favorisera la pérennité de leurs gènes, [10].

### **2.8.6 Croisement**

Le croisement a pour but d'enrichir la diversité de la population en manipulant la structure des chromosomes. Classiquement, les croisements sont envisagés avec deux parents et génèrent deux enfants, [14].

L'opérateur croisement favorise l'exploration de l'espace de recherche. Considérons deux gènes A et B pouvant être améliorés par mutation. Il est peu probable que les deux gènes améliorés A' et B' apparaissent par mutation dans un même individu. Mais l'opérateur de croisement permettra de combiner rapidement A' et B' dans la descendance de deux parents portant chacun un des gènes mutants. Il est alors possible que la présence simultanée des deux gènes produise un individu encore plus adapté [Dessales, 1996]. L'opérateur de croisement

assure donc le brassage du matériel génétique et l'accumulation des mutations favorables. En termes plus concrets, cet opérateur permet de créer de nouvelles combinaisons des paramètres des composants, [10].

Le phénomène de croisement est une propriété naturelle de l'ADN. C'est par analogie qu'ont été conçus les opérateurs de croisement dans les AG. Nous avons trois méthodes de croisement :

### 2.8.6.1 Croisement binaire

#### 2.8.6.1.1 Croisement en un point

On choisit au hasard un point de croisement, pour chaque couple (Figure 2.9). Notons que le croisement s'effectue directement au niveau binaire, et non pas au niveau des gènes. Un chromosome peut donc être coupé au milieu d'un gène, [10].

Pour effectuer ce type de croisement sur des chromosomes constitués de  $M$  gènes, on tire aléatoirement une position dans chacun des parents. On échange ensuite les deux sous-chaînes terminales de chacun des deux chromosomes, ce qui produit deux enfants  $C_1$  et  $C_2$ , [14].

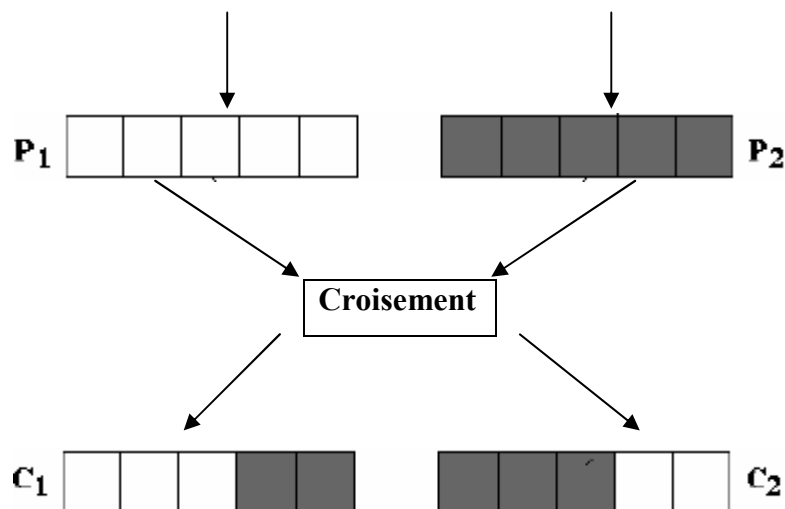
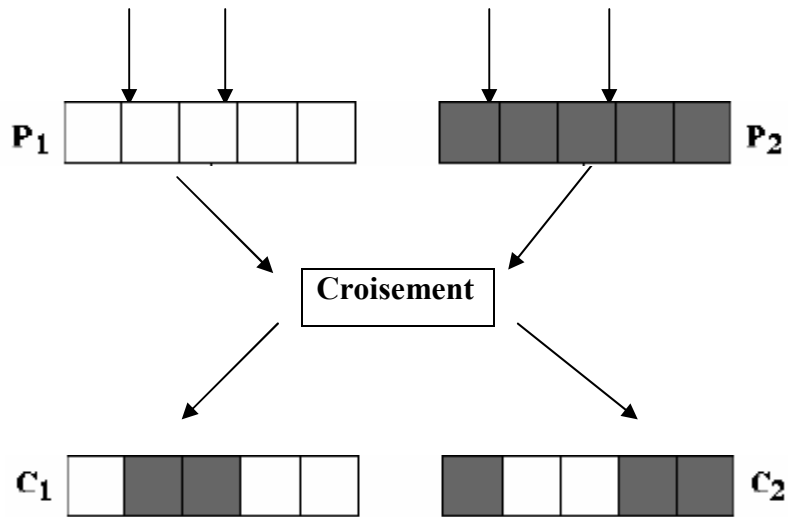


Fig.2.9 Croisement en un point

#### 2.8.6.1.2 Croisement en deux points :

On choisit au hasard deux points de croisement. Par la suite, nous avons utilisé cet opérateur car il est généralement considéré comme plus efficace que le précédent. Néanmoins nous n'avons pas constaté de différence notable dans la convergence de l'algorithme, [10].



**Fig.2.10** Croisement en deux points

### 2.8.6.2 Croisement réel

Le croisement réel ne se différencie du croisement binaire que par la nature des éléments qu'il altère : ce ne sont plus des bits qui sont échangés à droite du point de croisement, mais des variables réelles, [15].

### 2.8.6.3 Croisement barycentrique

Le type de croisement à découpage de chromosomes est très efficace pour les problèmes discrets.

Pour les problèmes continus, un croisement "barycentrique" est souvent utilisé : deux gènes  $P_1(i)$  et  $P_2(i)$  sont sélectionnés dans chacun des parents à la même position  $i$ . Ils définissent deux nouveaux gènes  $C_1(i)$  et  $C_2(i)$  par combinaison linéaire :

$$\begin{cases} C_1(i) = \alpha P_1(i) + (1 - \alpha) P_2(i) \\ C_2(i) = (1 - \alpha) P_1(i) + \alpha P_2(i) \end{cases} \quad (2,3)$$

Où  $\alpha$  est un coefficient de pondération aléatoire adapté au domaine d'extension des gènes (il n'est pas nécessairement compris entre 0 et 1, il peut par exemple prendre des valeurs dans l'intervalle  $[-0.5, 1.5]$  ce qui permet de générer des points entre, ou à l'extérieur des deux gènes considérés).

Dans le cas particulier d'un chromosome matriciel constitué par la concaténation de vecteurs, on peut étendre ce principe de croisement aux vecteurs constituant les gènes (figure 2.11), [14].

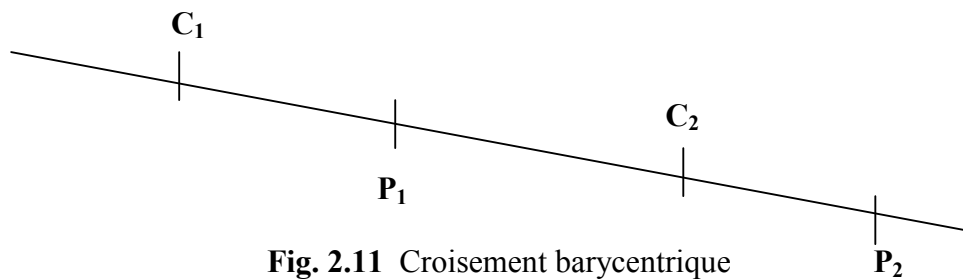


Fig. 2.11 Croisement barycentrique

### 2.8.7 Mutation

Nous définissons une mutation comme étant l'inversion d'un bit dans un chromosome (Figure 2.12). Cela revient à modifier aléatoirement la valeur d'un paramètre du dispositif. Les mutations jouent le rôle de bruit et empêchent l'évolution de se figer. Elles permettent d'assurer une recherche aussi bien globale que locale, selon le poids et le nombre des bits mutés. De plus, elles garantissent mathématiquement que l'optimum global peut être atteint.

Pour les problèmes discrets, l'opérateur de mutation consiste généralement à tirer aléatoirement un gène dans le chromosome et à le remplacer par une valeur aléatoire (figure 2.13). Si la notion de distance existe, cette valeur peut être choisie dans le voisinage de la valeur initiale, [15].

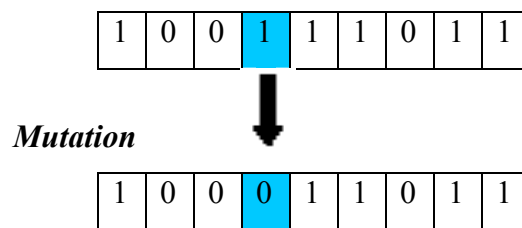


Fig.2.12 Représentation schématique d'une mutation dans un chromosome.

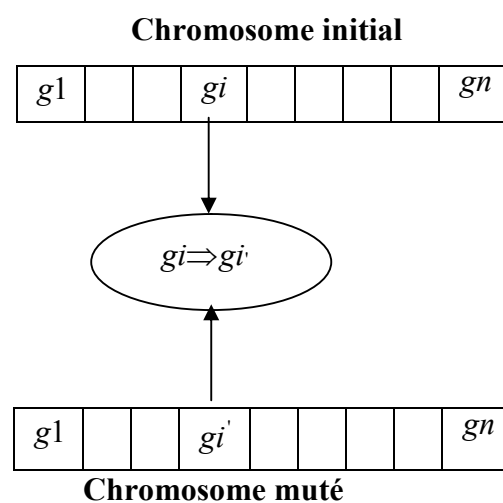


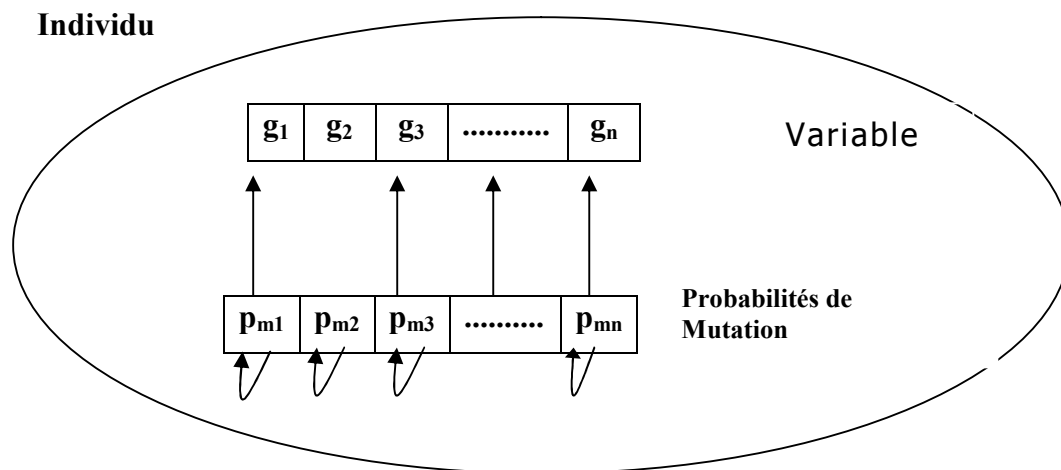
Fig.2.13 Principe de l'opérateur de mutation

### 2.8.7.1 Probabilité de mutation

De nombreuses méthodes existent pour réaliser l'opérateur mutation. Souvent la probabilité de mutation  $p_m$  par bit et par génération est fixée entre 0,001 et 0,01. On peut prendre également  $p_m = 1/k$  où  $k$  est le nombre de bits composant un chromosome. Il est possible d'associer une probabilité différente à chaque gène. Et ces probabilités peuvent être fixes ou évoluer dans le temps, [10].

La probabilité de mutation représente la fréquence à laquelle les gènes d'un chromosome sont mutés.

- S'il n'y a pas de mutation, le fils est inséré dans la nouvelle population sans changement.
- Si la mutation est appliquée, une partie du chromosome est changée, [10].



**Fig.2.14** principe de l'auto-adaptation.

A chaque variable est associée sa propre probabilité de mutation, qui est elle-même soumise au processus d'évolution. L'individu possède donc un second chromosome codant ces probabilités.

Après divers essais, nous avons abouti à la méthode d'auto-adaptation des probabilités de mutation [Bäck, 1992]. Si dans un environnement stable il est préférable d'avoir un taux de mutation faible, la survie d'une espèce dans un environnement subissant une évolution rapide nécessite un taux de mutation élevé permettant une adaptation rapide. Les taux de mutation d'une espèce dépendent donc de leur environnement [Wills, 1991].

Pour prendre en compte cette formulation biologique et l'adapter à notre cas, nous avons introduit dans chaque individu (dispositif) un second chromosome (ensemble de

paramètres) dont les gènes (paramètres) représentent les probabilités de mutation de chaque gène du premier chromosome (Figure 2.14). Ce second chromosome est géré de façon identique au premier, c'est-à-dire qu'il est lui-même soumis aux opérateurs génétiques (croisement et mutation). Cela revient à fixer les probabilités assurant la modification des valeurs des paramètres du composant en fonction des valeurs d'un ensemble d'autres paramètres (les probabilités de mutation).

Lors de la genèse, les probabilités de mutation sont posées égales à 0,1 (valeur qui nous a paru la meilleure après plusieurs essais). Au cours du déroulement de l'algorithme, les gènes et les individus ayant des probabilités de mutation trop élevées ont tendance à disparaître. De même, les gènes ayant des probabilités de mutation trop faibles ne peuvent pas évoluer favorablement et tendent à être supplantés. Les probabilités de mutation dépendent donc du gène considéré et de la taille de la population. De plus, elles évoluent au cours du temps. Il y a donc auto-adaptation des probabilités de mutation, [10, 15].

## **2.8.7.2 Les méthodes de mutation**

### **2.8.7.2.1 Mutation binaire**

La mutation binaire s'applique à un seul chromosome. Un bit du chromosome est tiré au hasard. Sa valeur est alors inversée.

Il existe une variante où plusieurs bits peuvent muter au sein d'un même chromosome. Un test sous le taux de mutation est effectué non plus pour le chromosome mais pour chacun de ses bits : en cas de succès, un nouveau bit tiré au hasard remplace l'ancien, [15].

### **2.8.7.2.2 Mutation réelle**

La mutation réelle ne se différencie de la mutation binaire que par la nature de l'élément qu'elle altère : ce n'est plus un bit qui est inversé, mais une variable réelle qui est de nouveau tirée au hasard sur son intervalle de définition, [15].

### **2.8.7.2.3 La mutation uniforme**

Ce type de mutation est simple. Les individus à muter seront choisis aléatoirement et seront remplacés par des valeurs choisies aléatoirement dans l'intervalle de recherche, [12].

### **2.8.7.2.4 Mutation non uniforme**

La mutation non uniforme possède la particularité de retirer les éléments qu'elle altère dans un intervalle de définition variable et de plus en plus petit. Plus nous avançons dans les générations, moins la mutation s'écarte des éléments de la zone de convergence.

Cette mutation adaptative offre un bon équilibre entre l'exploration du domaine de recherche et un affinement des individus

Le coefficient d'atténuation de l'intervalle est un paramètre de cet opérateur, [15].

### **2.8.7 Critère d'arrêt**

Les critères d'arrêts sont de deux natures :

- Arrêt après un nombre de génération fixée a priori. C'est la solution retenue lorsqu'un impératif de temps de calcul est imposé.
- Arrêt lorsque la population cesse d'évoluer ou n'évolue plus suffisamment rapidement, on est alors en présence d'une population homogène dont on peut penser qu'elle se situe à proximité du ou des optimums.

Il est à noter qu'à ce stade, aucune certitude concernant la bonne convergence de l'algorithme n'est assurée. Comme dans toute procédure d'optimisation l'arrêt est arbitraire, et la solution "en temps fini" ne constitue qu'une approximation de l'optimum, [11].

## **2.9 Les problèmes de l'algorithmes génétique**

### **2.9.1 Le codage**

L'un des problèmes les plus importants est le codage des données : c'est difficile de trouver un bon codage adaptée à la structure du problème.

L'application de la fonction de décodage lors l'évaluation de la fitness est coûteuse en temps de calcul.

Les opérateurs de croisement et mutation ne tiennent aucun compte de la structure du problème.

### **2.9.2 La dominance**

La domination d'un chromosome provoque la disparition rapide de certains éléments de la population, mais la méthode des AG présente plusieurs solutions contrairement à d'autres algorithmes comme recuit simulé qui présente une seule solution, alors il faut éliminer les chromosomes et laisser le meilleur (le mieux adapté).

### **2.9.3 Le croisement**

L'un des problèmes des AG c'est la position de codage, par exemple : Une propriété importante est codée dans une chaîne de 8 bits par le 1<sup>er</sup> et le 8<sup>th</sup> bit, dans ce cas tout croisement peut se faire facilement mais si le codage est fait entre le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>nd</sup> bit le croisement sera presque insensible.

C'est de ça qu'on vient l'idée de réorganiser les bits dans un chromosome de façon à créer des blocs stables.

#### 2.9.4 Les chromosomes haploïdes et diploïdes

Un chromosome haploïde a une chaîne de bits et un chromosome diploïde a deux chaînes de bits.

Un chromosome haploïde est beaucoup utilisé par rapport au chromosome diploïde, ce dernier n'est efficace que lorsque la fonction de fitness varie en fonction du nombre de génération de l'AG  $f(c,n)$  (ou  $n$  est le numéro de génération de l'A.G.) au lieu d'être simplement en fonction de  $c$ .

Mais les organismes vivants les plus évolués ont des chromosomes diploïdes. Les chromosomes diploïdes ont des grandes capacités à mémoriser par l'intermédiaire de gènes récessifs, [11].

Les algorithmes génétiques peuvent être utilisés en tant que méthode de recherche combinatoire incluant, des propriétés basées sur le parallélisme et l'exploration, des heuristiques de recherche intéressantes basées sur des principes d'auto-organisation.

#### 2.10 Application des AGs aux fonctions mathématiques

On a constaté qu'il est d'intérêt de développer la procédure de la mise en œuvre d'un algorithme génétique pour résoudre des problèmes d'optimisation concrétisés par des exemples.

##### 2.10.1 Procédure de Maximisation des Fonctions 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 de 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  $k$  bits, avec  $k$  vérifiant les inéquations suivantes :

$$2^{(k-1)} < (b-a)10^n \leq 2^k \quad (2,4)$$

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

$$x'_j = \sum_{i=0}^{i=k-1} a_i 2^i \quad (2,5)$$

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

$$x_j = a + x'_j \left( \frac{b-a}{2^k - 1} \right) \quad (2,6)$$

➤ Pour chaque génération les calculs suivants sont effectués :

- Calcul de la fonction d'évaluation  $f_{eval}(x_j)$  pour chaque chromosome  $v_j$ ,
- Calcul de l'évaluation totale, F, de la population constitué de N individus :

$$F = \sum_{j=1}^N f_{eval}(x_j) \quad (2,7)$$

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

$$P_{sj} = \frac{f_{eval}(x_j)}{F} \quad (2,8)$$

- Calcul de la probabilité de cumulative,  $q_j$ , pour chaque chromosome :

$$q_j = p_1 + p_2 + \dots + p_j \quad (2,9)$$

- 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  $q_j$ . 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 des  $r_i$  ( $i = 2, N$ ).

Pour chaque chromosome de la nouvelle génération, on génère, au hasard, N nombres  $r$  dans  $[0, 1]$  et on les compare à la probabilité de croisement  $P_c$ . Si  $r_i < P_c$ , le  $i^{\text{ème}}$  chromosome est sélectionné pour le croisement, sinon il n'est pas.

Croisement des chromosomes 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 bit de l'ensemble des gènes des différents chromosomes si le nombre généré arbitrairement  $r \leq$  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.

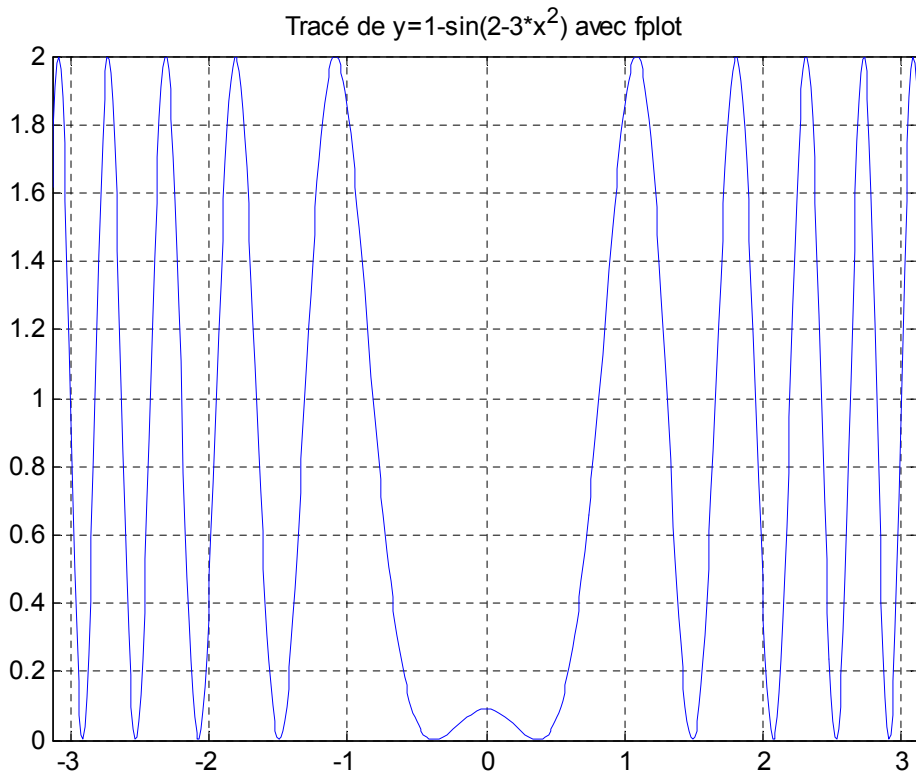
### 2.10.2 Exemples simples

On va tester l'algorithme pour faciliter la compréhension de l'implémentation de l'approche génétique.

#### • Maximisation d'une fonction à une variable

Cherchons le maximum de  $f(x) = 1 - \sin(2 - 3x^2)$  dans l'intervalle  $[-1, 1]$  avec une précision de  $1/10$ .

L'allure de la fonction  $f(x)$  est représentée par la figure (2.15).



**Fig.2.15** L'allure de la fonction  $f(x)$

- ❖ Analytiquement, on voit que  $f'(x) = 6x \cdot \cos(2-3x^2)$ , et que le maximum correspond à  $x = 0$  et  $f(x) = 0.0905$ .
- ❖ Cherchons la longueur du chromosome (nombre de bits de la chaîne).
- ❖ La longueur de l'intervalle est  $1 - (-1) = 2$ .
- ❖ Chaque unité doit être subdivisée en 10 (précision souhaitée).
- ❖ Donc, l'intervalle est subdivisé en  $2 \times 10 = 20$  petits intervalles.
- ❖ Le nombre de bits requis pour représenter tous les réels considérés dans l'intervalle est  $k$  tel que

$$2^{(k-1)} \leq 20 \leq 2^k \quad k = 5$$

- ❖ Pour modéliser le problème, convenons de ce qui suit :

Une population de 4 individus (chromosomes), chaque individu codé sur 5 bits (gènes).

- ❖  $P_c = 0,6$  et  $P_m = 0,1$ .

Construisons aléatoirement la génération initiale.

$V_1$	10000	$x_1' = 16$	$x_1 = 1 + x_1' / (2^5 - 1) = 0.0323$	$eval(x_1) = 0.0894$
$V_2$	10011	$x_2' = 19$	$x_2 = 0.2258$	$eval(x_2) = 0.0379$
$V_3$	10001	$x_3' = 17$	$x_3 = 0.0968$	$eval(x_3) = 0.0794$

$$V_4 \quad 10010 \quad x_4' = 18 \quad x_4 = 0.1613 \quad \text{eval}(x_4) = 0.0610$$

La somme des évaluations est 0.2677 ; la plus grande évaluation 0.0894 et la valeur moyenne 0.0669.

❖ Formons la première génération.

➤ **Sélection**

En calculant les probabilités de sélection, on obtient :

$$P_1 = 0,3340 \quad Q_1 = 0,3340$$

$$P_2 = 0,1416 \quad Q_2 = 0,4756$$

$$P_3 = 0,2965 \quad Q_3 = 0,7721$$

$$P_4 = 0,2279 \quad Q_4 = 1$$

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

$$0.9501 \quad 0.2311 \quad 0.6068 \quad 0.4860$$

$$r = 0,9501 \quad Q_4 > 0,9501 \quad V_4 \text{ est sélectionné}$$

$$r = 2311 \quad Q_1 > 0,2311 \quad V_1 \text{ est sélectionné}$$

$$r = 0,6068 \quad Q_3 > 0,6068 \quad V_3 \text{ est sélectionné}$$

$$r = 0,4860 \quad Q_3 > 0,4860 \quad V_3 \text{ est sélectionné}$$

La première génération devient :

$$V_1' \quad 10010$$

$$V_2' \quad 10000$$

$$V_3' \quad 10001$$

$$V_4' \quad 10001$$

➤ **Croisement**

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  $r < 0,6$ , le chromosome est sélectionné pour le croisement. On obtient : 0.8913    0.7621    0.4565  
0.0185.

Alors  $V_3$  et  $V_4$  sont sélectionnés.

Cela donne pour le croisement :

$$V_3' \quad 10001 \rightarrow 10001$$

$$V_4' \quad 10001 \rightarrow 10001$$

Après croisement on obtient :

$$V_1'' \quad 10010$$

$$V_2'' \quad 10000$$

V3'' 10001

V4'' 10001

➤ **Mutation**

Il y a  $4 \times 5 = 20$  bits.

On tourne la roulette 20 fois pour générer  $r$  dans  $[0, 1]$ . Si  $r < 0,1$ , on mute, alors le 19<sup>ième</sup> bit qui correspond au 4<sup>ième</sup> bit du 4<sup>ième</sup> vecteur.

Finalement, la première génération devient :

V1 10010

V2 10000

V3 10001

V4 10011

En évaluant la première génération, on obtient :

$X_1 = 0.1613$      $eval(V_1) = 0.0610$

$X_2 = 0.0323$      $eval(V_2) = 0.0894$

$X_3 = 0.0968$      $eval(V_3) = 0.0794$

$X_4 = 0.2258$      $eval(V_4) = 0.0379$

Evaluant totale = 0.2677 la plus grande valeur = 0.0894 la valeur moyenne = 0.0669.

On vient de terminer une itération de la boucle "Tant que", et la solution délivrée par cette génération est  $X_2 = 0.0323$  qui correspond à  $f(X_2) = 0.0894$ .

➤ **Formons la deuxième génération**

En prenant maintenant comme population initiale la première génération et en refaisant la boucle "tant que" (on applique les opérateurs de sélection, de croisement et de mutation) on obtient la deuxième génération :

V1 10011     $x_1 = 0.2258$      $eval(V_1) = 0.0379$

V2 10000     $x_2 = 0.0323$      $eval(V_2) = 0.0894$

V3 10000     $x_3 = 0.0323$      $eval(V_3) = 0.0894$

V4 10011     $x_4 = 0.2258$      $eval(V_4) = 0.0379$

Somme des évaluations = 0.2546.

La plus grande valeur = 0.0894 (revient 2 fois).

La moyenne = 0.0637.

En formant la troisième génération, à partir de la deuxième, on obtient :

Somme des évaluations = 0.2778.

La plus grande valeur = 0.0894 (revient 2 fois).

La moyenne = 0.0694.

Ensuite la quatrième génération à partir de la troisième, on trouve :

Somme des évaluations = 0.3009.

La plus grande valeur = 0.0894 (revient 2 fois).

La moyenne = 0.0752.

Dans la cinquième génération, on a trouvé :

Somme des évaluations = 0.3009.

La plus grande valeur = 0.0894 (revient 2 fois).

La moyenne = 0.0752.

Donc la population cesse d'évoluer, on est alors en présence d'une population homogène, dans ce cas, on peut constater que la maximisation de la fonction  $f(x)$  donne le maximum  $f(x) = 0.0894$  après 5 générations.

## 2.11 Conclusion

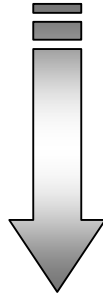
Les algorithmes génétiques fournissent des solutions proches de la solution optimale à l'aide des mécanismes de sélection, de croisement et de mutation

Les algorithmes génétiques peuvent constituer une alternative intéressante lorsque les méthodes d'optimisation traditionnelles (méthode "grimpeur", méthodes analytiques telle que les moindres carrés) ne parviennent pas à fournir efficacement des résultats fiables.

Cependant, comme nous l'avons souvent souligné au cours de ce chapitre, la plupart des mises en œuvre courantes des AG nécessitent un environnement suffisamment tolérant pour laisser à l'algorithme le "droit à l'erreur". Ceci implique que l'environnement doit permettre l'essai et l'évaluation de solutions-candidates médiocres.

L'algorithme génétique employé seul constitue un mécanisme de recherche souvent "trop aveugle" alors il peut rendre plus efficace si on le combine avec des méthodes de recherche traditionnelles, habituellement plus locales (régulateur classique, régulateur flou ou un système de commande neuronal).

# CHAPITRE 03



LES MOTEURS  
ASYNCHRONES 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, [16].

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, [17].

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 Moteur asynchrone à haut rendement

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

Le tableau (3.2.a) 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, [18].

charge		100%		75%		50%	
hp	Type	$\eta$	$F_p$	$\eta$	$F_p$	$\eta$	$F_p$
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	86.5	89.5	80.0

**Tabl. 3.2.a** Comparaison entre les moteurs à haut rendement et les moteurs classiques.

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

de réduire les pertes dues à l'effet joule. 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, [18].

Le tableau (3.2.b) compare et illustre l'effet de l'augmenter le volume du matériau actif et l'effet d'optimiser la conception de moteur dans l'ordre d'améliorer le rendement, [17].

<b>Chaîne de puissance (kW)</b>		<b>1.1</b>	<b>2.2</b>	<b>3.0</b>	<b>4.0</b>	<b>7.5</b>	<b>11</b>	<b>22</b>	<b>55</b>	<b>75</b>
IEEE AZAZGA IEC 34- T2	Poids (kg)	12	22	24	42	66	92	190	455	610
	$\eta$ (%)	74	78	79	83	86	88	90.5	93	94
VEM Moteurs IEC60034-2	Poids (kg)	15.5	23.5	30	37	70	92	170	375	520
	$\eta$ (%)	76.6	81	82.6	84.2	87	88.4	90.5	93.5	94.1

**Tabl.3.2.b** Poids et rendement pour différente gamme de puissance

Par conséquent, l'amélioration d'efficacités des moteurs à induction a un effet important sur l'économie d'énergie, principalement en Algérie où le parc existant de moteurs électriques a une efficacité inférieure globale relativement à ceux utilisées dans les pays industrialisés. Suite à l'augmentation du coût énergétique électrique de notre pays, impose à nous que nous devons remodeler notre "*politique énergétique*" nationale, [17].

### **3.3 Caractéristiques des moteurs à haut rendement**

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

- L'acier mince et de bonne qualité pour le stator
- Une augmentation de la qualité pour le stator
- Une minimisation de l'épaisseur de cuivre dans les enroulements
- 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 (E-E.Ms), 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 la durée de vie de l'isolation du bobinage et des roulements du moteur augmente. 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, [6]

### **3.4 L'économie d'énergie en utilisant E-E-Ms**

De nos jours, les consommateurs sont plus avertis et intéressés par la conservation d'énergie et le coût de fonctionnement inférieur, comme mentionné avant, il y a beaucoup d'approches pour économiser de l'énergie par :

Choisissant le moteur approprié, en utilisant les convertisseurs de fréquence variables seulement l'économie d'énergie en utilisant E-E.Ms, en tenant compte des meilleurs facteurs de qualité – taille – coût, [17].

#### **3.4.1 Qualité du moteur**

Le choix de la qualité de moteur avec des conduites de rendement élevé à l'économie d'énergie particulièrement, si la différence de prix d'achat est relativement petite, même quelques %, qui peuvent mener à l'économie d'énergie significative. Ceci signifie que le moteur fonctionne avec un coût inférieur et développe la même puissance, [17].

#### **3.4.2 Taille du moteur**

Le choix de la taille de moteur est également très important. Par exemple, si le moteur est relativement surdimensionné à son application, alors il fonctionne dans des conditions au-dessous de la charge, avec une efficacité et un fonctionnement plus faible avec un coût plus élevé. Néanmoins, si le moteur est bien classé, ceci mène à l'économie d'énergie significative, [17].

### **3.4.3 Le coût du moteur**

La décision d'acheter un moteur doivent être basées sur le rapport de coût/avantage. Il est plus intéressant d'acheter plus cher, mais il peut être meilleur marché et mener par conséquent à l'économie d'énergie. Significative, [17].

## **3.5 Procédé d'économie d'énergie**

L'entreprise a concentré ses efforts sur les facteurs qui contribuent de plus aux pertes énergétiques des moteurs, soit sur la ventilation, la dissipation de chaleur, les matériaux, la conception des ventilateurs, les systèmes d'isolation et les procédés de fabrication.

En 1986, les chercheurs ont ouvert une nouvelle technique conçue spécialement pour les essais de son nouveau système d'isolation. L'isolation électrique présente une barrière thermique autour des conducteurs de cuivre de l'enroulement du moteur. Une isolation de grande épaisseur entraîne une température de fonctionnement élevée et laisse moins de place au cuivre. En réduisant l'épaisseur de l'isolation et en augmentant la quantité de cuivre, on réduit la température de fonctionnement et les pertes dans les conducteurs.

Le système d'isolation amélioré comprend une isolation plus mince, une meilleure résistance à l'effet de couronne et une meilleure dissipation de chaleur. Ces améliorations ont réduit la température de fonctionnement du moteur tout en réduisant les pertes électriques en augmentant la quantité de cuivre dans l'enroulement. Grâce à la réduction de la température de fonctionnement, les moteurs se contentent d'un débit d'air réduit, ce qui réduit les pertes de ventilation et de frottement

En même temps, les chercheurs ont amélioré le système de ventilation des moteurs. Résultat:

- Un meilleur écoulement de l'air et une meilleure dissipation de la chaleur.
- Le débit d'air réduit a permis l'utilisation de ventilateurs plus efficaces.
- Les pertes dues au ventilateur constituent normalement une partie considérable des pertes de ventilation et de frottement, [19].

### **3.5.1 Avantage d'économiser l'énergie**

#### **3.5.1.1 Energétique**

Les moteurs représentent environ 50 % de toute la consommation d'électricité industrielle. Puisque tous les moteurs électriques donnent un rendement énergétique supérieur à celui de la plupart des autres convertisseurs d'énergie, un moteur à haut rendement

énergétique doit avoir un rendement considérablement supérieur au rendement moyen des moteurs industriels du même type et de la même puissance. Dans le cas des grands moteurs, une augmentation du rendement de 0,05 % a jugé considérable.

Des essais ont démontré que les nouveaux grands moteurs à haut rendement énergétique développés peuvent réduire les pertes énergétiques d'environ 18 % par rapport aux conceptions précédentes. Le fabricant estime que, depuis le début du programme en 1984, les économies énergétiques cumulatives pour les utilisateurs des nouveaux moteurs sont d'environ 1,5 millions de giga-joules, soit l'équivalent de 250 000 barils de pétrole, [19].

### **3.5.1.2 Environnement**

Les nouveaux moteurs à haut rendement énergétique réduisent la demande d'électricité, ce qui réduit l'incidence de la production d'électricité sur l'environnement. En outre, des techniques de fabrication améliorées permettent de produire plus de moteurs à l'aide de la même quantité d'énergie et de matériaux. Donc, moins de déchets et moins de pollution, [19].

### **3.5.1.3 Aspects économiques**

Les moteurs à haut rendement énergétique coûtent plus cher que les moteurs standard. Sa durée de vie, soit normalement plus de 20 ans, le grand moteur consomme dans la moyenne environ de 75 fois son prix d'achat en électricité

Les calculs des seuils de rentabilité, varient selon les méthodes de comptabilité utilisées, mais pour déterminer le meilleur achat, il y a trois facteurs principaux à considérer :

- le nombre d'heures quotidiennes de fonctionnement
- la charge du moteur et le tarif de la compagnie d'électricité locale pour l'énergie électrique

Plus que le facteur d'utilisation du moteur est élevé, plus la charge du moteur est grande et plus le tarif d'énergie électrique est élevé, donc plus la prime justifiable pour un rendement supérieur peut être élevée, [19].

## **3.6 Le rendement d'un moteur asynchrone**

Le rendement d'un moteur électrique représente, le rapport énergétique de machine pendant la conversion de l'énergie électrique dans la transmission mécanique. Elle est définie comme suit :

$$\eta = \frac{P_{\text{mécanique}}}{P_{\text{électrique}}} = \frac{P_{\text{mécanique}}}{P_{\text{électrique}} + \Sigma P_{\text{pertes}}} \quad (3,1)$$

La somme Les pertes peuvent être :

- pertes joule de stator et de rotor ( $P_{JS}$  et  $P_{JR}$ )
- pertes mécaniques ( $P_{Mec}$ )

Les pertes supplémentaires il est très difficile a mesuré ces pertes. Même si les pertes supplémentaires ont été objet de plusieurs études et analyse, les phénomènes qui régissent ces pertes sont toujours à l'étude, en particulier du point de vue de mesure. La norme (IEEE 112-B) définit ces pertes comme différence entre les pertes totales mesurées et les pertes conventionnelles, comme rapporté dans l'équation

$$P_{\text{Sup}} = ( P_{\text{Électriques}} - P_{\text{Mécaniques}} ) - P_{\text{Conventionnel}} \quad (3,2)$$

$$P_{\text{Conventionnel}} = ( P_{JS} + P_{JR} + P_{\text{fer}} + P_{\text{Mec}} ) \quad (3,3)$$

Afin de limiter les pertes supplémentaires, quelques solutions possibles sont représentées par l'isolation de barre de rotor (pour limiter les inter –barres courants de fuite), en employant un double enroulement de couche avec des contributions d' espace harmoniques, par une réduction des variations du flux dans les dents de moteur à haute fréquence. Il est important de remarquer qu'une réduction forte des pertes supplémentaires peut impliquer une augmentation non négligeable du rendement de la machine, [20]

### 3.7 Evaluation du rendement d'une machine asynchrone

Le rendement d'un système électrique dépend de plusieurs facteurs tels que: le rendement du moteur et les techniques du contrôle, les qualités du réseau de distribution et le système d'alimentation la transmission mécanique c'est à dire ; problèmes d'entretien et d'entraînement et la gestion de la charge, pour l'amélioration du rendement d'un système électrique, différentes approches sont proposées. Ces dernières utilisent principalement la vitesse variable, ainsi qu'une dimension optimale des moteurs électriques pour améliorer leur conception. La première approche a un rapport avec le réseau, alors que la seconde est en rapport avec le concepteur du moteur lui-même. Pour l'évaluation du rendement, divers méthodes sont proposées.

- Méthode de la plaque signalétique.
- Méthode directe.
- Méthode Statistique.

- Méthode du circuit équivalente.
- Méthode des pertes séparées, [21].

Toutes ces méthodes déterminent le rendement selon la définition exprimée par l'équation

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_m} = \frac{\text{Puissance mécanique}}{\text{Puissance électrique}} \quad (3,4)$$

La puissance absorbée sous forme électrique est mesurée directement, mais la puissance mécanique est évaluée en déduisant les pertes calculées, et peut être obtenu directement ou indirectement, dans différents chemins. Dans le cas indirect qui constitue la tâche la plus difficile ou les pertes doivent être réparties, par une variété de méthodes normalisées. En effet, les pertes dans les machines tournantes peuvent être divisées en trois groupes principaux:

Pertes Electriques  $P_{Elect}$

Pertes magnétiques de Fer  $P_{fer}$

Pertes Mécaniques  $P_{Mec}$

Un quatrième groupe moins important de quelques pertes supplémentaires dues aux phénomènes parasites (flux de fuite) est nommé:  $P_{sup}$

### 3.8 Normes et méthode d'évaluation le rendement

Les moteurs à induction sont généralement les plus utilisés dans l'industrie. Ils peuvent se trouver de quelques cent 'W' jusqu'aux plusieurs 'MW', les moteurs à induction sont caractérisés par des données fournies par le fabricant tant que la vitesse la tension la puissance, le courant et le rendement évalué.

Le rendement du moteur électrique prend des valeurs différentes selon les épreuves expérimentales accomplies et la précision de l'appareil utilisée.

Les données d'efficacité fournies par des fabricants sont mesurées ou calculées selon certaines normes. Ces normes emploient différentes manières à l'incorporer les pertes additionnelles de charge. Pour le moteur à induction les normes les plus usagées et plus importantes pour la détermination du rendement sont, [20] :

#### 3.8.1 IEEE 112-B

Cette norme est la plus importante dans l'industrie parce qu'il est applicable à l'axe horizontal, poliphasé, accumuler les moteurs à induction à cage d'écurieil avec la puissance dans la gamme 1 ÷ 190 kilowatts. La méthode ( IEEE 112-B ) exige trois essais, en particulier.

### **3.8.1.1 Essai thermique à une charge donnée**

Le fait de la machine à charge donnée jusqu'aux températures principales de moteur (les enroulement de stator, noyau de stratification de stator et armature externe), a mesuré chaque 30 minutes, ne change pas moins de  $10\text{ C}^\circ$ . A la fin de cet essai, la résistance d'enroulement de stator doit être mesurée.

### **3.8.1.2 Essai à vide**

Le moteur, alimenté sous une tension et fréquence donnée, sans charge mécanique jusqu'au les roulements sont stabilisés (entre deux mesures consécutives espacé sur 30 minutes, la puissance d'entrée n'augmente pas au-dessus des 3 %), alors un essai variable de tension est réalisé.

### **3.8.1.3 Essai à la charge variable sous conditions données**

Sachant que le moteur est dans l'état d'équilibre thermique sous une charge donnée, le moteur est chargé avec le couple décroissant de la charge (de 150 % jusqu'à, 25 % du couple évalué) La température d'enroulement n'a pas pour changer plus de  $10\text{ C}^\circ$ .

En utilisant ces essais il est possible de déterminer toute la perte de moteur contributions et pour calculer l'efficacité de moteur. Pertes conventionnelles de fer ( $P_{\text{fer}}$ ) et pertes mécaniques ( $P_{\text{Mec}}$ ) sont données par l'essai à vide. Par l'essai à charge les pertes de joule de stator et de rotor ( $P_{\text{JS}}$  et  $P_{\text{JR}}$ ) sont données, considérant que les pertes supplémentaires sont calculées par l'essais à charge variable en utilisant l'équation (3.1) et les autres pertes déterminées précédemment. Puis les pertes supplémentaires obtenues à partir d'un graphe de la variation des pertes en fonction de couple carré de charge. Ces valeurs doivent être lissées en utilisant une régression linéaire. Cette norme exige que les quantités électriques doivent être mesurées avec une exactitude mieux que le 0.2%, et avec une 0.5% stabilité de tension et de 0.1% une tolérance fréquence. L'erreur absolue de vitesse maximum est 1 t/mn. Elle est important pour se rappeler que la norme (IEEE 112-B) rapporte d'autres méthodes. Ces méthodes sont applicables à la taille particulière ou type de moteurs (par exemple, la méthode considère des moteurs avec une puissance évaluée moins de 1 kilowatt) ou eux prescrivent des essais et procédures différentes par analysées, [20].

### **3.8.2 IEC 60034-2:**

Cette norme fournit plusieurs méthodes et procédures pour les mesures du rendement selon le type et les tailles de machine, avec l'exactitude voulus. Ces méthodes peuvent être subdivisées dans deux catégories :

### 3.8.2.1 Méthode directe

La puissance absorbée et fournie à l'axe du moteur a mesuré directement

### 3.8.2.2 Méthode indirecte :

Les pertes sont mesurées par des essais , le rendement est évalués suivant la puissance absorbée de moteur

"La méthode indirecte" convient à une comparaison directe avec l'IEEE 112- B. cette méthode exige :

un essai à vide conventionnel pour mesurer "les pertes constantes " (somme des pertes fer et les pertes mécaniques)

Les pertes joule de stator sont évaluées en utilisant la résistance mesurée et rapportée à la température de référence (cette température dépend du classe d'isolation de la machine , pour cette raison, elle est indépendante à la variation de la température pendant les essais en charge)

les pertes joule du rotor sont données comme produit de glissement de rotor et la puissance transmise

Les pertes supplémentaires sont considérées en fonction du courant de stator et elles sont assumées à la charge donnée conditionner par 0.5% de la puissance absorbée En utilisant la définition précédente de perte, le rendement est défini comme

$$\eta = \frac{P_{\text{électrique}} - \sum \text{Pertes}}{P_{\text{électrique}}} \quad (3,4)$$

La norme impose que tout les quantités électrique et mécanique doivent être mesurées avec une exactitude mieux que 0.5%, [20]

### 3.8.3 JEC 37

Néglige simplement ce genre de perte (perte supplémentaire) , pour cette raison, le rendement obtenue est généralement plus élevé .En outre, aucune correction thermique des pertes joule n'est indiquée puisqu'il est très difficile de trouver les procédures de mesure prescrites par la norme japonaise. Il est raisonnable d'évaluer le rendement de la machine en utilisant les résultats des essais exigés par les autres normes.

- il y a d'autres normes largement discutées, CSA C-390 de l'association canadienne de normes, ce qui très semblable à la norme d'IEEE 112-b, l'Association Nationale des Fabricants Electriques (NEMA-MG1), Le fabricant Electro-Industry Algérienne (E.E.I.

Azazga), utilise la norme Allemande (VACARME) et VDE 0530, lesquelles sont conformes à l'IEC 34-T2, [20].

### **3.9 Méthodes de mesures**

Les méthodes d'essai à analyser sont décrites dans les normes IEEE 112/1991, le IEC 34-2/1972, CSA C-390/1993 et ABNT NBR 5383/1982 (norme brésilienne ).

De ces quatre normes mentionnées ci-dessus, cinq groupes des méthodes sont réalisés pour déterminer le rendement d'une machine asynchrone, [22].

#### **3.9.1 Méthode 1**

La puissance d'entrée et le rendement est mesurée directement, selon des normes d'IEEE, de IEC et de NBR.

#### **3.9.2 Méthode 2**

La puissance d'entrée et le rendement est mesurée avec la séparation de pertes et la mesure indirecte des pertes supplémentaires de charge, selon des normes d'IEEE et de CSA. La méthode 2 peut fournir des résultats différents de la méthode 1, principalement due aux ajustements des pertes supplémentaires de charges dans lesquels toutes les erreurs de mesure sont incluses.

#### **3.9.3 Méthode 3**

Comme vu dans les normes d'IEEE, de IEC et de NBR., deux machines ( machine à courant continu, machine à courant alternatif ) sont couplées, dans le premier essai on va mesurer la puissance de deux machines couplées, puis dans le deuxième essai on va mesure la puissance d'une seul machine, dont la différence de deux puissances donne la somme des pertes

#### **3.9.4 Méthode 4**

Méthode avec la mesure directe des pertes supplémentaires de charge et de la séparation des pertes, selon des normes d'IEEE, de IEC, NBR et de CSA.

Dans cette méthode, le rendement est indirectement calculé

#### **3.9.5 Méthode 5**

Méthode dans laquelle le circuit équivalent est déterminé, selon des normes IEEE, NBR et de CSA.

Le rendement de moteur calculé est basé sur les paramètres du circuit équivalent. Dans cette méthode, il est très important de prendre l'impédance de rotor au basse fréquence, [22].

### **3.10 Techniques d'augmentation du rendement des moteurs asynchrones**

En général, l'augmentation de l'efficacité de moteurs à induction peut être réalisée par :

- Commande d'entraînement de moteur quand les machines sont déjà manufacturées
- Optimisations du circuit magnétiques concernant les machines qui sont sous la conception. , [17].

Avec ces deux solutions, plusieurs travaux sont déjà réalisés :

- AC Speed- Governing Experiment System with Analogue Load  
Réalisé par: Chen zhengshi, H.-P.Beck, Lu zhen, Wang zhiyong
- Optimization of the Geometry of Closed Rotor Slots for Cage Induction Motors  
Réalisé par: S. Williamson, Fellow, I. Catherine McClay
- Induction Motor Maximizer Using Multi-Layer Fuzzy Control (MLFC)  
Réalisé par: T. Haung, M. El-Sharkawi
- Control of Induction Motors for both High Dynamic Performance and High Power Efficiency  
Réalisé par : Gyu-Sik Kim, InJoong Ha, and Myoung-Sam KO
- Minimum-Time Minimum-Loss Speed Control of Induction Motors Under Field-Oriented Control  
Réalisé par: Jae Ho Chang, Byung Kook Kim

### **3.11 Conclusion**

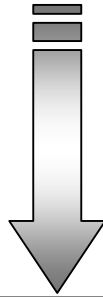
L'augmentation et l'amélioration du rendement fait l'objet de plusieurs études et analyses a travers le monde, le moteur asynchrone comme tous les moteurs électriques a la réputation d'avoir de bon rendement, au niveau constructive.

le rendement des moteurs asynchrones peut être augmenter par :

- La réduction de chacun des principaux postes des pertes joule des enroulements du stator. Les moteurs ont profité des caractéristiques thermiques améliorées des isolants modernes, pour augmenter la température de service des enroulements
- La réduction des pertes dans le fer du stator en utilisant des aciers de meilleure qualité.

Ce chapitre il est consacré à l'amélioration du rendement du moteur asynchrone, comme il est mentionné .Pour améliorer le rendement de moteur deux approches peuvent être adoptées :  
Nous devons agir par un choix approprié du classement de la taille du moteur, ou en actionnant sur le moteur avec le même rendement, Par l'action sur la conception de moteur, qui signifie d'augmenter le volume du matériau actif (fer, cuivre)

# CHAPITRE 04



## AMELIORATION DU RENDEMENT DE LA MAS PAR L'AG

### 4.1 Introduction

Lorsqu'on veut construire une machine électrique, on ne doit pas seulement tenir compte de ses propriétés électromagnétiques, mais faire en sorte que sa construction et son exploitation soient économiques et rentables.

Les facteurs qui influent sur les dimensions du moteur sont multiples et variés selon le type de la machine à construire. Pour les machines asynchrones, ce sont les conditions de démarrage, la capacité de surcharge, le facteur de puissance et le rendement qui sont déterminants, [23].

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 à 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 une première partie de ce chapitre on présentera la procédure de calcul et de dimensionnement d'une machine asynchrone, ensuite on va optimiser leur rendement a l'aide des algorithmes génétique avec une stratégie d'adaptation des espaces de recherche.Elle vise à déterminer aléatoirement les valeur optimales des paramètres de la machine asynchrone a haut rendement.

## 4.2 Conception de la machine

### 4.2.1 Calcul préliminaire

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, [23] :

$$p_s = \frac{A_1 B_\delta K_{wl} 60 n_s D^2 l_i 10^{-3}}{8.6 \cdot 10^{-3}} \quad (4,1)$$

$$\frac{p_s \cdot 10^{-3}}{D^2 l_i 60 n_s} = \frac{K_{wl} B_\delta A_1}{8.6 \cdot 10^3} = C \quad (4,2)$$

Tel que :

$C$  Facteur d'utilisation.

$K_{wl}$  Facteur de bobinage ;

$l_i$  Longueur virtuelle de l'induit ;

$D$  Diamètre du stator à l'alésage.

En exprimant :  $\tau_p = \frac{\pi D}{2p}$

$\tau_p$  Pas polaire ;

$p$  Nombre de paires de pôles ;

$A_1$  La densité linéaire de courant à la périphérique de l'induit, tel que :

$$A_1 = \frac{2m_1 N_1 I}{\pi D} \quad (4,3)$$

Pour déterminer le diamètre  $D$  et la longueur virtuelle  $l_i$ , on utilise la relation empirique,

$$\frac{l_i}{\tau_p} = \sqrt[3]{p} = \lambda \quad (4,4)$$

Le rendement  $\eta$  et le facteur de puissance  $\cos \varphi$  sont tirés des diagrammes tracés à partir des études statistiques faites sur un grand nombre de moteurs, [23].

#### 4.2.2 Dimensionnement des encoches

Le stator des petites et moyennes machines, à basse tension, est exécuté avec des encoches trapézoïdales semi-ouvertes. Le choix de ce type d'encoches est d'assurer une meilleure insertion des conducteurs et obtenir un meilleur coefficient de remplissage de l'encoche. Puisque lors de la mise en encoche des enroulements, les conducteurs n'occupent pas tout l'espace qui leur y réservé. Le rapport de surface des conducteurs et d'encoches est appelé coefficient de remplissage. Ce rapport varie selon la capacité des ouvriers spécialisés dans la mise en place du bobinage. Il peut être, dans les meilleures conditions égal à 0.7 pour des machines de faibles puissances.

Pour le rotor à cage d'écureuil l'enroulement est formé de barres court-circuitées par des anneaux. On remarque que du point de vue électrique, on préfère des cages en cuivre car le cuivre possède une plus faible résistivité que l'aluminium ; on réduit ainsi les dimensions des encoches, ce qui influe beaucoup sur les paramètres de fonctionnement de la machine. Par contre l'aluminium est meilleur du point de vue coût et facilité de travail.

Les encoches sont rondes ou rectangulaires, Selon la technique d'exécution et la caractéristique demandée :

- Simple cage ;
- Double cage ;
- Cage à effet pelliculaire.

##### 4.2.2.1 Encoche statorique

Soit  $Z_1$  le nombre d'encoches du stator :

$$Z_1 = 2 \cdot p \cdot q \cdot m \quad (4,5)$$

Le choix de  $Z_1$  revient à choisir le nombre d'encoches par pôle  $p$  et par phase  $q$ .

#### 4.2.2.2 Encoche rotorique

Pour le choix du nombre d'encoches rotorique  $Z_2$ , il n'existe aucune théorie. Cependant il existe des tableaux établis à partir d'essais ou résultats pratiques pour le choix de  $Z_2$  en fonction du nombre de paires de pôles  $p$  et du nombre d'encoches statorique  $Z_1$ , [23].

#### 4.2.3 Enroulement de la machine

➤ **Le facteur de bobinage  $K_{wl}$**

$$K_{wl} = K_{p1} \cdot K_{d1} \quad (4,6)$$

$K_{p1}$  Facteur de raccourcissement ;

$K_{d1}$  Facteur de distribution.

• **Facteur de distribution**

$$K_{d1} = \frac{\sin(\pi / (2m))}{q \sin(\pi / (2\pi q))} \quad (4,7)$$

• **Facteur de raccourcissement**

Il est défini par :

$$K_{p1} = \sin \beta \frac{\pi}{2} \quad (4,8)$$

Avec :

$$\beta = \frac{C'}{\tau_p} \quad (4,8')$$

$C'$  L'ouverture de la bobine.

#### 4.2.4 Calcul de la F.M.M

La loi de la circulation constitue la base fondamentale pour le calcul du circuit magnétique. Elle s'énonce comme suit :

la circulation du champ magnétique  $H$  le long d'une ligne fermée est égale à la somme des forces magnétomotrices (F.M.M) :

$$\oint H \cdot dl = F \quad (4,9)$$

Où  $H$  représente la composant de  $H$  dans la direction de  $dl$ .

Pour  $N$  spires par phase parcourues par un même courant  $I$ , on a :

$$F = N \cdot i \quad (4,10)$$

Dans le calcul du circuit magnétique des machines électriques, on remplace l'intégrale  $\oint H \cdot dl$  par une somme  $\sum H_i l_i$ , et on choisit les différents tronçons  $l_i$  du circuit de telle façon que les intensités de champ  $H_1, H_2, \dots$ . Le long de ceux-ci puissent être considérées comme constantes. Dans ces conditions, l'équation (4,9) devient, [23]:

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_n l_n = F \quad (4,11)$$

$H$  Est exprimé en A/m ;

$l$  En mètre (m) ;

$F$  En Ampère tours (At).

Le calcul de la valeur de la F.M.M. s'effectue de la manière suivante :

Connaissant la valeur de  $B_\delta$  et les dimensions du moteur on calcule le flux  $\phi$  par pôle, on peut déterminer aisément les valeurs de l'induction  $B_i$  et du champ magnétique  $H_i$  dans chaque tronçon par conservation du flux :

$$B_i = \frac{\phi_i}{S_i} \quad , \quad H_i = \frac{B_i}{\mu_i} \quad , \quad \mu_i = \mu_0 \mu_{ri} \quad (4,12)$$

$\mu_0$  Perméabilité magnétique de l'air.

$\mu_{ri}$  Perméabilité relative du matériau, [23].

#### 4.2.4.1 Chutes de potentiels magnétiques partiels

##### 4.2.4.1.1 La chute de potentiels magnétiques dans l'entrefer

La chute de potentiel magnétique dans l'entrefer est proportionnelle à la valeur de l'induction  $B_\delta$  dans l'entrefer et à l'épaisseur  $\delta$  de celui-ci :

$$F_\delta = H_\delta \cdot \delta = \delta \cdot \frac{B_\delta}{\mu_0} \quad (4,13)$$

En outre :

$$B_\delta = \frac{\phi_\delta}{S_\delta} \quad (4,14)$$

On note que  $S_\delta$  la surface virtuelle traversée par le flux.

$$S_\delta = b_i \cdot l_i \quad (4,15)$$

Avec :

$$b_i = \alpha_i \cdot \tau_p \quad (4,16)$$

$\alpha_i$  Coefficient d'aplatissement de la courbe.

$$\alpha_i = \frac{B_{\delta eff}}{B_{\delta max}} < 1 \quad (4,17)$$

#### 4.2.4.1.2 La chute de potentiel magnétique dans les dents

Dans le cas général de calcul des machines électriques, on n'a pas intérêt d'avoir une saturation très forte qui augmenterait le courant à vide et provoquerait un échauffement exagéré de la machine, on a intérêt à avoir  $B_z < 1.8T$ . On supposerait dans ces conditions que tout le flux passe par la dent, pour calculer le champ magnétique dans cette dernière, on doit diviser la dent en plusieurs sections, puis on détermine le champ dans chaque section et on fait la somme des chutes de potentiels magnétiques :

$$F_z = \int_0^{h_z} H_{zy} . dl_z \quad (4,18)$$

Cependant dans la pratique, on utilise la règle de **Simpson** qui donne des résultats meilleurs, sachant qu'on subdivise la dent en trois parties, l'intensité moyenne du champ est calculée comme suit :

$$H_{z.moy} = \frac{1}{6} (H_{z.min} + 4.H_{z.med} + H_{z.max}) \quad (4,19)$$

$H_{z.min}$  La valeur du champ minimum dans la dent.

$H_{z.med}$  La valeur du champ médian dans la dent.

$H_{z.max}$  La valeur du champ maximum dans la dent.

$H_{z.moy}$  La valeur du champ moyenne dans la dent.

La valeur de la chute de potentiel magnétique dans la dent est:

$$F_z = h_z . H_{z.moy} \quad (4,20)$$

$h_z$  Hauteur de la dent.

Ce résultat est valable aussi bien pour le rotor que pour le stator. On refait le même calcul pour les deux parties tout en considérant les caractéristiques de chacune d'elle, [23].

#### 4.2.4.1.3 Chute de tension magnétique dans la culasse

Pour calculer la chute de tension magnétique dans la culasse, on suppose que le flux est uniformément réparti dans la section droite de celle-ci. Si l'on considère  $\phi$  le flux pénétrant dans la culasse, le flux traversant la section droite est égale à  $\phi / 2$ , on peut alors écrire:

$$B_{ji} = \frac{\phi}{2.K_{fe}.L_{fe}.h_{ji}} \quad (4,21)$$

$B_{ji}$  Induction dans la culasse statorique  $l = i$  ou rotorique  $2 = i$  ;

$h_{ji}$  Epaisseur de la culasse ;

Ligne de parcours moyenne pour les lignes d'induction dans les culasses.

➤ **Dans la culasse rotorique**

On prend pour la ligne de parcours moyenne:

$$h_{z2} = \frac{D - 2\delta - 2pt - h_{j2}}{2p} \cdot \pi \quad (4,22)$$

$h_{j2}$  Epaisseur de la culasse rotorique ;

$h_{z2}$  Profondeur de l'encoche rotorique ;

$pt$  Pont rotorique.

➤ **Dans la culasse statorique**

$$l_{j1} = \frac{D + 2h_{z1} + h_{j1}}{2p} \cdot \pi \quad (4,23)$$

$h_{z1}$  Profondeur (on hauteur) de l'encoche statorique ;

$h_{j1}$  Epaisseur de la culasse statorique.

La chute de potentiel magnétique dans la culasse rotorique ou statorique serait alors égal à :

$$F = H_{ji} \cdot l_{ji} \quad (4,24)$$

La valeur de  $H_{ji}$  est tirée de la caractéristique magnétique du fer utiliser après avoir calculer  $B_{ji}$  ;

La F.M.M total est égale à la somme des chutes de potentiel magnétique:

$$F_{tot} = 2F_{\delta} + 2F_{z1} + 2F_{z2} + F_{j1} + F_{j2} \quad (4,25)$$

#### 4.2.4.2 Coefficient de saturation

Le rapport de la somme des chutes de tensions FMMt : dans l'entrefer et les dents à la tension  $F_{\delta}$  est appelé coefficient de saturation  $K_s$ .

$$K_s = \frac{F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} > 1 \quad (4,26)$$

Le coefficient de saturation  $K_s$  à une grande influence sur les caractéristiques de la machine, puisque l'augmentation de  $K_s$  signifie une saturation dans les dents donc une augmentation de la FMM qui engendre une augmentation du courant magnétisant, et une diminution du facteur de puissance, [23].

#### 4.2.4.3 Coefficient de forme de la courbe d'induction

Par définition le coefficient de forme  $K_f$  représente le rapport de la valeur efficace de

l'induction dans l'entrefer  $B_{\delta_{eff}}$  à la valeur moyenne de l'induction dans l'entrefer  $B_{\delta}$ ,  $K_f \geq 1$ . Le coefficient  $K_f$  augmente quand la saturation diminue, [23].

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

Dans le paragraphe précédent on n'a pas tenu compte de la présence d'encoche pour calculer le pas polaire virtuel  $b_i$  ; cette dernière est prise en compte en remplaçant l'entrefer

$\delta$  par un entrefer fictif  $\delta'$  tel que  $\frac{\delta}{\delta'} = K_c > 1$

$K_c$  Est appelé facteur de carter.

$$F_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \cdot K_c \cdot \delta = \frac{\phi_{\delta}}{S_{\delta} \cdot \mu_0} \cdot K_c \cdot \delta \quad (4,27)$$

$\delta$  Entrefer.

#### 4.2.4.5 Courant magnétisant

L'équation (4,28) permet de calculer le courant magnétisant

$$I_m = \frac{p \cdot F_{tot}}{0.9 \cdot m_1 N_1 K_{w1}} \quad (4,28)$$

### 4.2.5 Les pertes

Comme on a déjà vu dans chapitre un, les pertes dans une machine électrique peuvent être divisées en trois parties :

- ✓ Les pertes par effet Joule ou pertes en cuivre ;
- ✓ Les pertes par Hystérésis, courant de Foucault et pulsation du flux ;
- ✓ Les pertes par frottement et ventilation qui sont très petites par rapport aux autres pertes.

#### 4.2.5.1 Pertes en cuivre

##### 4.2.5.1.1 Dans le stator

Les pertes par effet Joule dans les enroulements du stator sont :

$$P_{cul} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (4,29)$$

$R_1$  La résistance statorique par phase ;

$I_1$  Courant de phase ;

$m_1$  Nombre de phase.

##### 4.2.5.1.2 Dans le rotor

Pour le secondaire, les pertes dans le cuivre sont :

$$P_{cu2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_{2bar}^2 \quad (4,30)$$

$R_2$  La résistance totale d'une phase du secondaire ;

$I_2$  Courant de la barre.

#### 4.2.5.2 Pertes fer

Les pertes dans le fer se composent principalement de pertes Hystérésis et pertes par courant de Foucault.

##### 4.2.5.2.1 Pertes d'Hystérésis

Les pertes d'Hystérésis représentent l'énergie nécessaire à l'aimantation cyclique alternative du fer, [23].

Le calcul de ces pertes est réalisé par l'équation suivante :

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_m^2 \quad (4,31)$$

$K_h$  Coefficient de pertes par Hystérésis ;

$B_m$  L'induction maximale dans le fer.

##### 4.2.5.2.2 Pertes par courant de Foucault

L'aimantation cyclique alternative engendre des courants induits dans le fer, ces courants sont appelés courants de Foucault, [23].

$$P_w = \sigma_w \cdot (S_t \cdot f \cdot B_m)^2 \cdot 10^2 \quad (4,32)$$

$S_t$  L'épaisseur de la tôle du fer ;

$B_m$  Induction maximale ;

$f$  Fréquence des courants ;

$\sigma_w$  Constante du fer.

##### 4.2.5.2.3 Pertes dans les dents

- Les pertes d'Hystérésis dans les dents d'encoche statorique des machines électrique sont égales à :

$$P_{hZ} = \sigma_H \cdot f \cdot B_Z^2 \cdot m_Z \cdot 10^{-2} \quad (4,34)$$

$m_Z$  Masse des dents ;

$B_Z$  Valeur moyenne des inductions au pied, au milieu et à la tête de la dent.

- Les pertes par courant de Foucault dans les dents sont :

$$P_{wZ} = \sigma_w (S_t \cdot f \cdot B_Z)^2 m_Z \cdot 10^2 \quad (4,35)$$

Enfin et après ces informations qui sont très nécessaire pour ce qui suit, on va donc au nectar de notre mémoire qui est l'amélioration du rendement des MAS à l'aide des AGs.

### **4.3 Notre proposition**

L'idée que nous avons proposé pour améliorer le rendement des MAS est d'appliquer l'approche d'AG sur des machines de différentes gammes de puissance et différents nombres de paire de pôle et voir l'influence de tels paramètres à l'augmentation de ce rendement.

Tout d'abord, on définit la fonction fitness (ou fonction objective) qui est la fonction que nous voulons l'optimiser, dans notre cas cette dernière sera la somme des pertes, où le but essentiel est de trouver le minimum de ces pertes.

Comme nous avons vu dans le deuxième chapitre, que les algorithmes ne se basent pas sur un individu, mais sur une population d'individus qui vont évoluer de génération en génération pour obtenir un résultat se rapprochant de la solution optimale. Les meilleurs individus d'une génération vont créer une nouvelle génération plus adaptée au problème. Bien qu'utilisant le hasard, les AGs ne sont pas purement aléatoires car ils suivent des lois probabilistes.

Pour réaliser ce travail, on a besoins de deux programmes : le premier contient la fonction de l'algorithme génétique principale, et le deuxième c'est un sous programme contient la fonction fitness, cette dernière est une fonction réservée pour le calcul du minimum. Ce travail est effectué sous l'environnement MATLAB 7 qui est un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique destiné aux ingénieurs et scientifique. Il possède un langage de programmation à la fois puissant et simple d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'une façon aisée, contrairement aux langages de programmation.

On va voir dans le travail suivant l'effets de l'induction magnétique, ainsi que la charge linéaire sur le rendement de la machine asynchrone. Comme deuxième étape on a essayé d'avoir qu'elle est l'influence de la fréquence sur ce rendement.

#### **4.3.1 Tableaux de résultats**

Les tableaux suivants représentent les résultats du programme d'optimisation et l'influence de tels paramètres sur le rendement de la machine.

Bien que l'AG représente un espace de recherche aléatoire, on a fait plusieurs exécutions pour trouver la solution optimale. Les tableaux suivants contiennent quelque cas obtenus.

##### **a) Influence de l'induction magnétique et la charge linéaire**

$P_u$	1.1	5.5	11	22	37	55	75	110	220
$\eta$	77	85	87	90	92	94	94.5	95	95.5
$\eta_{calculé}$	77.31	85.09	87.75	90.11	92.09	93.58	94.39	94.11	94.69
$B_\delta$	0.48	0.55	0.70	0.56	0.62	0.55	0.54	0.60	0.60
$A_1$	15000	19000	20500	22000	24000	26000	28000	28000	35000
$B_{\delta\ optimisé}$	0.4924	0.6046	0.7856	0.6126	0.7356	0.5666	0.5733	0.6299	0.6599
$A_{1\ optimisé}$	16475	22185	23507	23983	24346	29881	30855	31145	37690
$\eta_{\ optimisé}$	77.87	85.48	88.03	90.27	92.39	93.67	94.51	94.20	94.81
$B_{\delta\ optimisé}$	0.5183	0.6038	0.7223	0.5853	0.7367	0.6413	0.5742	0.6284	0.7027
$A_{1\ optimisé}$	15840	21401	24211	22974	27287	30231	30539	29371	41511
$\eta_{\ optimisé}$	78.34	85.47	87.84	90.19	92.39	94.01	94.51	94.19	94.87
$B_{\delta\ optimisé}$	0.5383	0.6183	0.7432	0.6248	0.6621	0.5674	0.5825	0.7162	0.6873
$A_{1\ optimisé}$	15018	19890	23948	25915	24933	30663	29440	28612	35550
$\eta_{\ optimisé}$	78.67	85.55	87.91	90.29	92.22	93.68	94.54	94.38	94.85
$B_{\delta\ optimisé}$	0.4841	0.5715	0.9221	0.5946	0.7097	0.6482	0.5548	0.6092	0.6248
$A_{1\ optimisé}$	15963	19967	21970	22826	24241	27352	30613	32297	40758
$\eta_{\ optimisé}$	77.70	85.26	88.15	90.22	92.33	94.03	94.44	94.14	94.74
$B_{\delta\ optimisé}$	0.5625	0.6575	0.7370	0.6172	0.7386	0.6103	0.5923	0.6867	0.6338
$A_{1\ optimisé}$	15273	19051	21885	23695	25070	28955	30343	28046	36885
$\eta_{\ optimisé}$	79.02	85.73	87.89	90.28	92.39	93.88	94.57	94.33	94.76
$B_{\delta\ optimisé}$	0.5741	0.6004	0.8286	0.5939	0.6822	0.5961	0.5687	0.7040	0.7025
$A_{1\ optimisé}$	17790	21418	24137	25967	27605	29108	30912	30361	41984
$\eta_{\ optimisé}$	79.17	85.45	88.11	90.22	92.27	93.82	94.49	94.36	94.87
$B_{\delta\ optimisé}$	0.5730	0.5677	0.7953	0.5640	0.7322	0.6188	0.5970	0.6068	0.7052
$A_{1\ optimisé}$	16652	22777	20879	23115	25919	31032	33149	29094	37768
$\eta_{\ optimisé}$	79.16	85.23	88.05	90.12	92.38	93.92	94.58	94.13	94.87
$B_{\delta\ optimisé}$	0.4843	0.6512	0.8563	0.6023	0.6616	0.6132	0.5624	0.6353	0.6392
$A_{1\ optimisé}$	17098	19083	22374	23795	25920	28231	32527	29092	36565
$\eta_{\ optimisé}$	77.70	85.70	88.14	90.24	92.22	93.90	94.47	94.21	94.77

**Tabl. 4.1** Résultats pour p=1

$P_u$	1.1	5.5	11	22	37	55	75	110	200
-------	-----	-----	----	----	----	----	----	-----	-----

$\eta$	74	84	88	90.5	92	93	94	94.5	95
$\eta_{calculé}$	74.85	84.38	88.09	90.16	91.89	92.89	93.64	94.12	94.94
$B_{\delta}$	0.55	0.55	0.58	0.60	0.63	0.65	0.63	0.63	0.62
$A_1$	18000	22500	25000	27000	26000	24500	28500	30500	32500
$B_{\delta_{optimisé}}$	0.6046	0.6485	0.5867	0.6966	0.7262	0.7678	0.6809	0.6373	0.6551
$A_{1_{optimisé}}$	21017	25033	29751	30683	30091	27010	31192	36296	35036
$\eta_{optimisé}$	75.90	85.79	88.17	90.81	92.48	93.41	93.83	94.15	95.08
$B_{\delta_{optimisé}}$	0.5517	0.6404	0.6154	0.6065	0.6594	0.7157	0.6634	0.6684	0.6753
$A_{1_{optimisé}}$	18765	24395	27117	30858	30857	26508	32247	33083	38444
$\eta_{optimisé}$	74.88	85.70	88.43	90.21	92.09	93.20	93.77	94.28	95.15
$B_{\delta_{optimisé}}$	0.5840	0.6532	0.6897	0.6880	0.7053	0.7332	0.6998	0.6842	0.6980
$A_{1_{optimisé}}$	18607	25527	28049	30612	30065	27543	29425	32417	36857
$\eta_{optimisé}$	75.54	85.85	89.01	90.76	92.37	93.27	93.89	94.33	95.22
$B_{\delta_{optimisé}}$	0.6298	0.5649	0.6229	0.7147	0.7239	0.7672	0.6408	0.6391	0.6919
$A_{1_{optimisé}}$	20294	24451	26956	22008	29306	28762	29756	34144	38014
$\eta_{optimisé}$	76.31	84.63	88.51	90.91	92.47	93.40	93.68	94.16	95.20
$B_{\delta_{optimisé}}$	0.6527	0.3306	0.6389	0.6462	0.6790	0.7189	0.6620	0.6963	0.6773
$A_{1_{optimisé}}$	19751	26324	25291	28113	27680	28053	31107	30545	36768
$\eta_{optimisé}$	76.66	85.57	88.64	90.50	92.21	93.22	93.77	94.37	95.15
$B_{\delta_{optimisé}}$	0.6187	0.5594	0.6237	0.6437	0.6774	0.6740	0.6558	0.7406	0.7220
$A_{1_{optimisé}}$	21179	24555	26885	28915	29323	27044	32948	31697	35489
$\eta_{optimisé}$	76.14	84.54	88.51	90.49	92.20	93.01	93.74	94.50	95.29
$B_{\delta_{optimisé}}$	0.5816	0.6158	0.6160	0.6195	0.6762	0.6711	0.7495	0.7127	0.7147
$A_{1_{optimisé}}$	20073	26018	28248	30854	28341	26129	29639	31852	36510
$\eta_{optimisé}$	75.49	85.38	88.44	90.31	92.20	93.00	94.04	94.42	95.27
$B_{\delta_{optimisé}}$	0.5533	0.6153	0.6938	0.6493	0.6349	0.7384	0.6411	0.7466	0.6272
$A_{1_{optimisé}}$	20291	23494	25038	28841	29757	27882	29996	34770	36404
$\eta_{optimisé}$	74.91	85.37	89.04	90.53	91.93	93.29	93.69	94.52	94.97

**Tabl. 4.2** Résultats pour p=2

$P_u$	1.1	5.5	11	22	37	55	75	110	200
$\eta$	74	84	88	90	91.5	93	93.5	94.5	94.5
$\eta_{calculé}$	73.33	83	87.08	89.65	90.66	92.04	92.76	93.62	93.98
$B_\delta$	0.50	0.56	0.65	0.59	0.61	0.63	0.65	0.68	0.66
$A_1$	18000	20500	26000	27000	28000	30000	31000	32500	34000
$B_{\delta\ optimisé}$	0.5346	0.6335	0.6575	0.7042	0.7196	0.6373	0.7035	0.7329	0.6676
$A_{1\ optimisé}$	21276	22246	30941	29053	28278	35701	35588	35021	40461
$\eta_{optimisé}$	73.33	84.34	87.17	90.58	91.41	92.10	93.05	93.84	94.01
$B_{\delta\ optimisé}$	0.5813	0.6073	0.6896	0.6391	0.6999	0.6684	0.7202	0.7942	0.7832
$A_{1\ optimisé}$	18355	24134	28202	30900	28519	32541	35727	35327	39901
$\eta_{optimisé}$	75.51	83.90	87.49	90.10	91.29	92.32	93.14	94.05	94.42
$B_{\delta\ optimisé}$	0.5368	0.6700	0.7059	0.6706	0.6711	0.6441	0.7301	0.8155	0.7742
$A_{1\ optimisé}$	21206	24158	27634	31424	31639	30427	37021	34866	37775
$\eta_{optimisé}$	74.40	84.89	87.66	90.34	91.11	92.15	93.18	94.11	94.39
$B_{\delta\ optimisé}$	0.5121	0.5662	0.6594	0.7014	0.7290	0.7083	0.7061	0.6859	0.7494
$A_{1\ optimisé}$	19649	20096	29106	28125	32961	31406	31746	35942	35622
$\eta_{optimisé}$	73.71	83.13	87.18	90.55	91.47	92.57	93.07	93.64	94.31
$B_{\delta\ optimisé}$	0.5842	0.5900	0.7434	0.7002	0.6931	0.6971	0.7026	0.7721	0.7020
$A_{1\ optimisé}$	20049	23627	27592	30375	29479	30667	34203	37604	39230
$\eta_{optimisé}$	75.57	83.59	88.01	90.54	91.25	92.50	93.05	93.98	94.15
$B_{\delta\ optimisé}$	0.5837	0.6683	0.6517	0.5976	0.6523	0.6464	0.7403	0.7545	0.7259
$A_{1\ optimisé}$	18843	20901	30261	29537	31430	30078	31206	32797	38194
$\eta_{optimisé}$	75.55	84.87	87.10	89.72	90.98	92.16	93.23	93.92	94.24
$B_{\delta\ optimisé}$	0.5821	0.6058	0.6734	0.6848	0.7109	0.7505	0.6969	0.7635	0.7765
$A_{1\ optimisé}$	21470	23135	26706	27038	29200	30410	33117	37664	38724
$\eta_{optimisé}$	75.53	83.87	87.33	90.44	91.36	92.81	93.02	93.95	94.40
$B_{\delta\ optimisé}$	0.5995	0.6449	0.6509	0.6400	0.6278	0.6949	0.7630	0.7225	0.6979
$A_{1\ optimisé}$	19517	22524	29056	28.667	29771	34283	31291	35815	37515
$\eta_{optimisé}$	75.92	84.52	87.09	90.10	90.80	92.49	93.33	93.80	94.14

**Tabl. 4.3** Résultats pour p=3

## b) Influence de la fréquence

$P_u$	1.1	5.5	11	22	37	55	75	110	220
$\eta$	77	85	87	90	92	94	94.5	95	95.5
$\eta_{calculé}$	77.31	85.09	87.75	90.11	92.09	93.58	94.39	94.11	94.69
$f_s$	[40 60]	[40 60]	[40 60]	[40 60]	[40 60]	[40 60]	[40 60]	[40 60]	[40 60]
$f_{s\ optimisé}$	59.003	49.738	51.322	47.133	46.249	53.334	47.209	58.509	42.735
$\eta_{optimisé}$	78.66	85.06	87.84	89.94	91.88	93.79	94.24	94.42	94.40
$f_{s\ optimisé}$	45.794	44.449	59.278	54.173	43.860	48.745	58.652	53.654	43.516
$\eta_{optimisé}$	76.41	84.43	88.22	90.28	91.72	93.50	94.71	94.26	94.44
$f_{s\ optimisé}$	54.533	49.712	51.894	54.316	54.797	57.836	51.055	40.478	50.750
$\eta_{optimisé}$	78.07	85.06	87.87	90.28	92.30	94.02	94.43	93.53	94.71
$f_{s\ optimisé}$	46.454	49.386	54.729	54.962	48.972	46.779	56.723	46.141	54.233
$\eta_{optimisé}$	76.56	85.03	88.04	90.30	92.04	93.35	94.65	93.91	94.81
$f_{s\ optimisé}$	46.629	47.018	49.903	48.049	45.633	56.338	44.415	49.838	52.326
$\eta_{optimisé}$	76.60	84.77	87.74	90.00	91.84	93.95	94.08	94.10	94.76
$f_{s\ optimisé}$	56.328	46.591	52.984	57.939	47.268	44.099	44.287	40.778	49.682
$\eta_{optimisé}$	78.32	84.71	87.94	90.38	91.94	93.12	94.07	93.55	94.68
$f_{s\ optimisé}$	45.143	59.827	45.276	57.422	48.002	42.134	58.622	44.943	41.339
$\eta_{optimisé}$	76.25	85.77	87.34	90.36	91.99	92.93	94.70	93.84	94.33
$f_{s\ optimisé}$	58.200	43.085	55.209	51.525	58.997	53.101	52.887	46.733	51.272
$\eta_{optimisé}$	78.57	84.22	88.06	90.17	92.43	93.78	94.51	93.95	94.73
$f_{s\ optimisé}$	44.631	56.053	55.071	42.149	42.193	46.122	59.495	47.368	56.479
$\eta_{optimisé}$	76.12	85.57	88.06	89.54	91.59	93.29	94.73	93.98	94.85
$f_{s\ optimisé}$	59.751	46.447	47.658	50.244	52.678	57.457	54.691	49.909	51.113
$\eta_{optimisé}$	78.75	84.69	87.56	90.12	92.21	94.00	94.58	94.10	94.72
$f_{s\ optimisé}$	43.403	53.561	46.385	46.454	58.411	50.757	40.880	50.725	49.654
$\eta_{optimisé}$	75.79	85.40	87.45	89.90	92.41	93.63	94.14	94.14	94.69

**Tabl. 4.4** Résultats pour p=1

$P_u$	1.1	5.5	11	22	37	55	75	110	200
$\eta$	74	84	88	90.5	92	93	94	94.5	95
$\eta_{calculé}$	74.85	84.38	88.09	90.16	91.89	92.89	93.64	94.12	94.94
$f_s$	[40 60]	[40 60]	[40 60]	[40 60]	[40 60]	[40 60]	[40 60]	[40 60]	[40 60]
$f_{s\ optimisé}$	49.729	51.798	56.691	50.804	41.474	42.967	48.041	40.130	59.654
$\eta_{optimisé}$	74.78	84.72	88.91	90.25	90.89	92.25	93.51	93.36	95.37
$f_{s\ optimisé}$	59.608	51.798	56.842	50.650	43.268	48.491	52.584	48.401	45.328
$\eta_{optimisé}$	76.85	84.72	88.93	90.23	91.13	92.77	93.79	94.02	94.65
$f_{s\ optimisé}$	45.546	40.515	42.467	42.665	47.184	45.281	59.336	42.987	48.492
$\eta_{optimisé}$	73.59	82.12	86.84	89.17	91.60	92.48	94.09	93.62	94.86
$f_{s\ optimisé}$	45.607	55.523	57.587	54.989	51.514	42.465	59.206	53.023	48.040
$\eta_{optimisé}$	73.61	85.36	89.00	90.67	92.04	92.19	94.09	94.29	94.83
$f_{s\ optimisé}$	43.302	59.564	41.767	59.003	59.258	44.356	55.384	53.140	44.423
$\eta_{optimisé}$	72.86	85.95	86.70	91.01	92.63	92.39	93.93	94.30	94.58
$f_{s\ optimisé}$	55.890	42.463	52.824	45.794	48.005	41.404	52.172	57.708	47.291
$\eta_{optimisé}$	76.17	82.66	88.47	89.64	91.69	92.07	93.77	94.50	94.78
$f_{s\ optimisé}$	50.778	48.469	46.995	54.533	40.242	57.481	45.849	42.925	41.003
$\eta_{optimisé}$	75.05	84.07	87.64	90.63	90.71	93.37	93.35	93.62	94.31
$f_{s\ optimisé}$	49.088	46.337	51.769	46.801	40.130	50.961	53.495	49.715	57.034
$\eta_{optimisé}$	74.61	83.61	88.33	89.77	90.69	92.96	93.84	94.11	95.27
$f_{s\ optimisé}$	48.134	56.865	48.697	53.111	48.401	50.232	44.282	51.127	49.896
$\eta_{optimisé}$	74.35	85.56	87.91	90.49	91.73	92.91	93.23	94.19	94.69
$f_{s\ optimisé}$	59.643	59.479	44.946	42.267	42.987	48.419	48.569	52.176	50.987
$\eta_{optimisé}$	76.86	85.94	87.30	89.11	91.10	92.76	93.55	94.25	95.00
$f_{s\ optimisé}$	51.380	41.408	54.984	50.060	58.927	49.022	42.301	49.235	40.047
$\eta_{optimisé}$	75.19	82.37	88.72	90.17	92.61	92.81	93.06	94.08	94.23

**Tabl. 4.5** Résultats pour p=2

$P_u$	1.1	5.5	11	22	37	55	75	110	200
$\eta$	74	84	88	90	91.5	93	93.5	94.5	94.5
$\eta_{calculé}$	73.33	83.00	87.08	89.65	90.66	92.04	92.76	93.62	93.98
$f_s$	[40 60]	[40 60]	[40 60]	[40 60]	[40 60]	[40 60]	[40 60]	[40 60]	[40 60]
$f_{s\ optimisé}$	59.003	59.937	55.975	43.806	40.050	40.138	50.746	59.525	53.718
$\eta_{optimisé}$	76.01	85.01	88.00	88.67	89.17	90.76	92.82	94.14	94.20
$f_{s\ optimisé}$	59.227	59.592	49.648	51.271	43.006	40.967	49.036	59.355	55.725
$\eta_{optimisé}$	76.07	84.95	87.02	89.82	89.67	90.89	92.67	94.14	94.30
$f_{s\ optimisé}$	55.685	59.337	56.813	49.718	40.119	59.545	53.213	45.282	40.820
$\eta_{optimisé}$	75.11	84.91	88.11	89.61	89.18	92.86	93.01	93.25	93.25
$f_{s\ optimisé}$	41.338	58.402	55.323	40.644	50.687	43.614	58.246	53.600	48.258
$\eta_{optimisé}$	69.89	84.74	87.91	88.05	90.74	91.28	93.35	93.85	93.87
$f_{s\ optimisé}$	59.344	54.316	55.978	42.797	42.654	58.508	58.013	57.465	58.653
$\eta_{optimisé}$	76.09	83.96	88.00	88.48	89.61	92.79	93.34	94.05	94.43
$f_{s\ optimisé}$	54.457	48.936	59.051	54.479	47.430	53.414	47.919	52.847	40.170
$\eta_{optimisé}$	74.76	82.74	88.40	90.21	90.33	92.37	92.56	93.80	93.18
$f_{s\ optimisé}$	45.594	55.320	54.402	41.087	51.261	42.325	43.284	42.344	46.540
$\eta_{optimisé}$	71.72	84.16	87.78	88.14	90.80	91.10	92.08	92.98	93.74
$f_{s\ optimisé}$	40.582	55.839	47.907	53.679	57.486	50.424	55.192	41.441	47.007
$\eta_{optimisé}$	69.54	84.26	86.70	90.12	91.43	92.09	93.16	92.89	93.78
$f_{s\ optimisé}$	48.088	47.950	50.564	51.596	59.397	46.966	46.595	53.446	57.456
$\eta_{optimisé}$	72.67	82.49	87.17	89.86	91.59	91.70	92.44	93.84	94.38
$f_{s\ optimisé}$	45.751	46.203	54.132	49.685	53.148	49.496	54.533	51.308	48.257
$\eta_{optimisé}$	71.78	82.02	87.74	89.60	91.01	91.99	93.11	93.71	93.87
$f_{s\ optimisé}$	46.814	47.836	46.935	51.642	43.440	47.193	58.346	56.507	46.621
$\eta_{optimisé}$	72.19	82.46	86.51	89.87	89.74	91.73	93.36	94.00	93.75

**Tabl. 4.6** Résultats pour p=3

### Légende

- $P_u$  [KW] Puissance utile ;  
 $\eta$  [%] Rendement donné ;  
 $\eta_{calculé}$  [%] Rendement calculé ;  
 $B_\delta$  [T] Induction magnétique donnée ;  
 $A_1$  [At/m] Charge linéaire donnée ;

$B_{\delta_{optimisé}}$  [T] Induction magnétique optimisée ;

$A_{l_{optimisé}}$  [At/m] Charge linéaire optimisée ;

$\eta_{optimisé}$  [%] Rendement optimisé ;

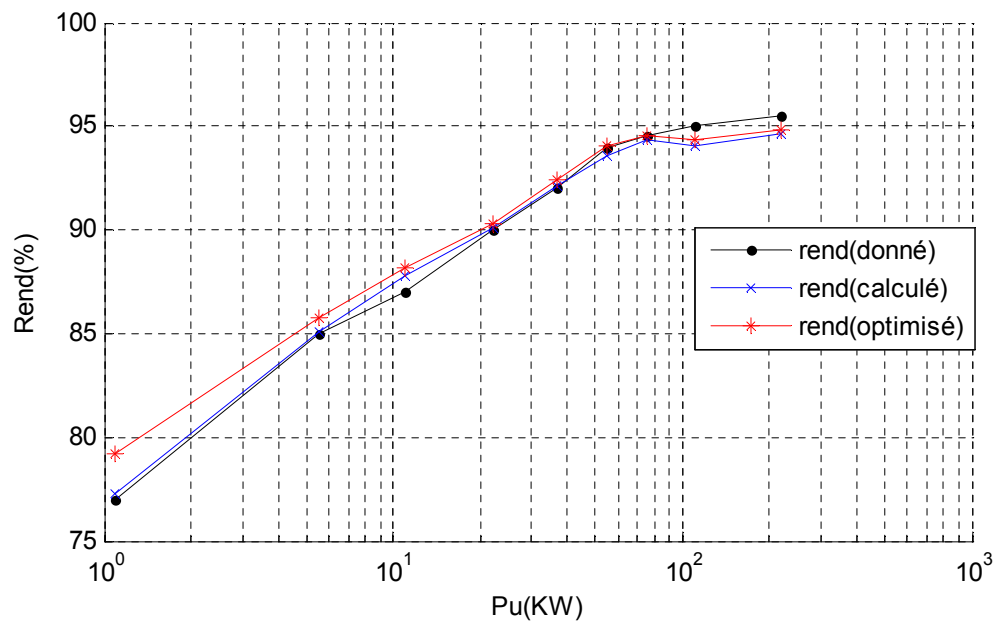
$f_s$  [Hz] Fréquence ;

$f_{s_{optimisé}}$  [Hz] Fréquence optimisée.

Les cases colorées dans les tableaux contiennent les max des rendements optimisés.

### 4.3.2 Les courbes

#### a) Influence de l'induction magnétique d'entrefer et de la charge linéaire



**Fig. 4.1** Caractéristique  $\eta = f(Pu)$  pour  $P = 1$

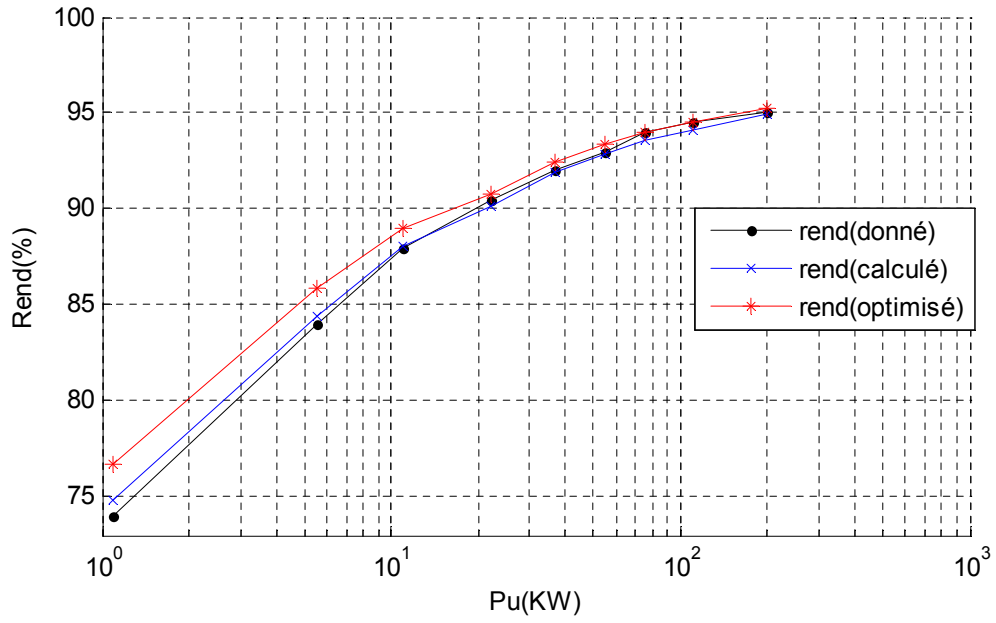


Fig. 4.2 Caractéristique  $\eta = f(P_u)$  pour  $P = 2$

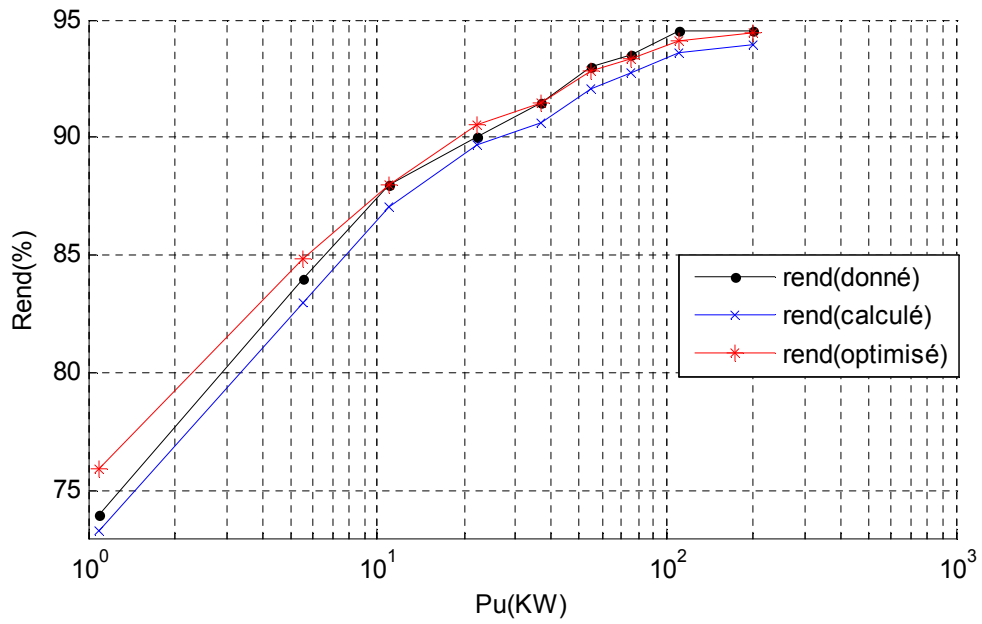


Fig. 4.3 Caractéristique  $\eta = f(P_u)$  pour  $P = 3$

## b) Influence de la fréquence

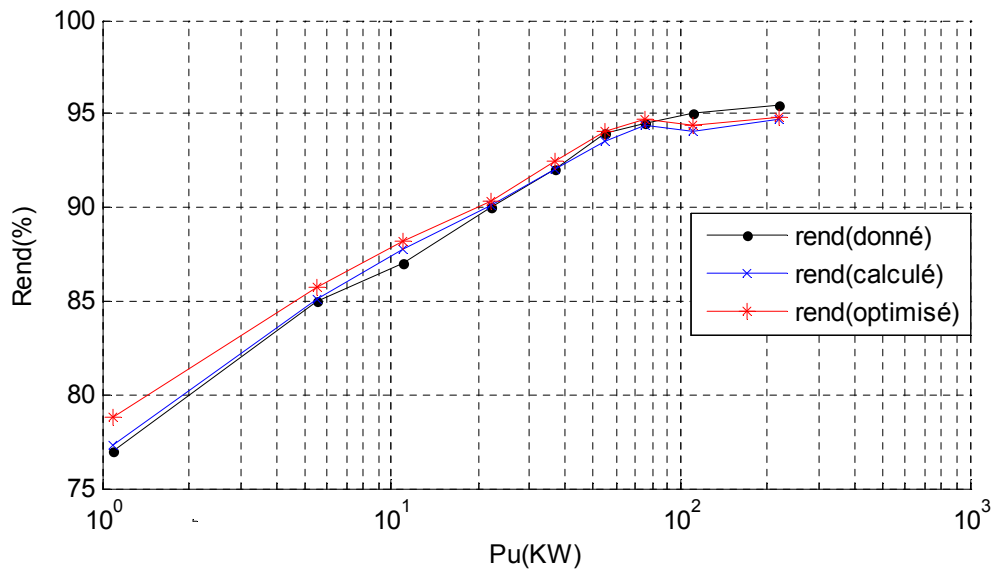


Fig. 4.4 Caractéristique  $\eta = f(Pu)$  pour P = 1

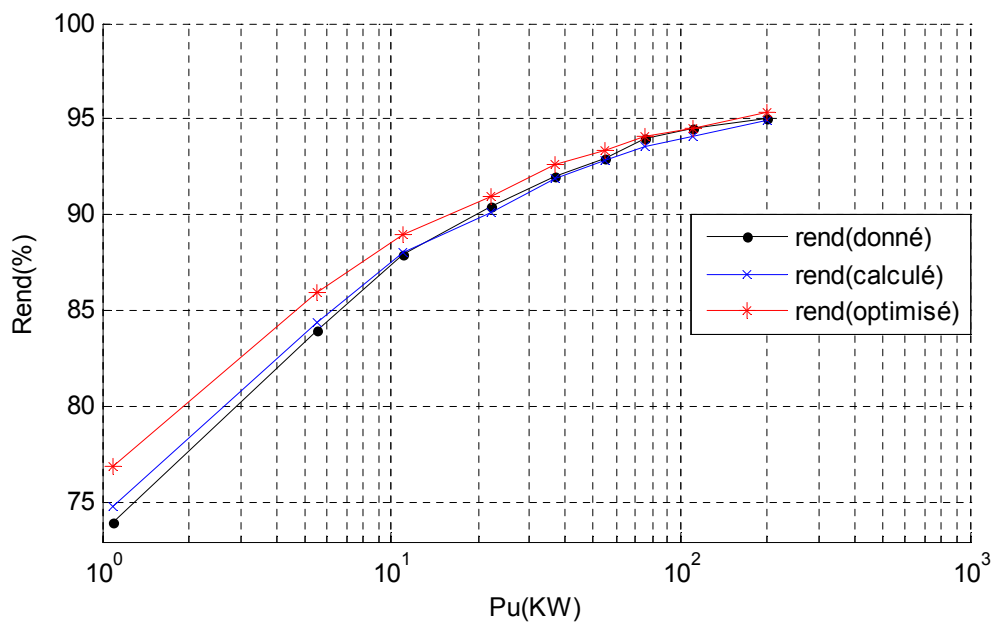


Fig. 4.5 Caractéristique  $\eta = f(Pu)$  pour P = 2

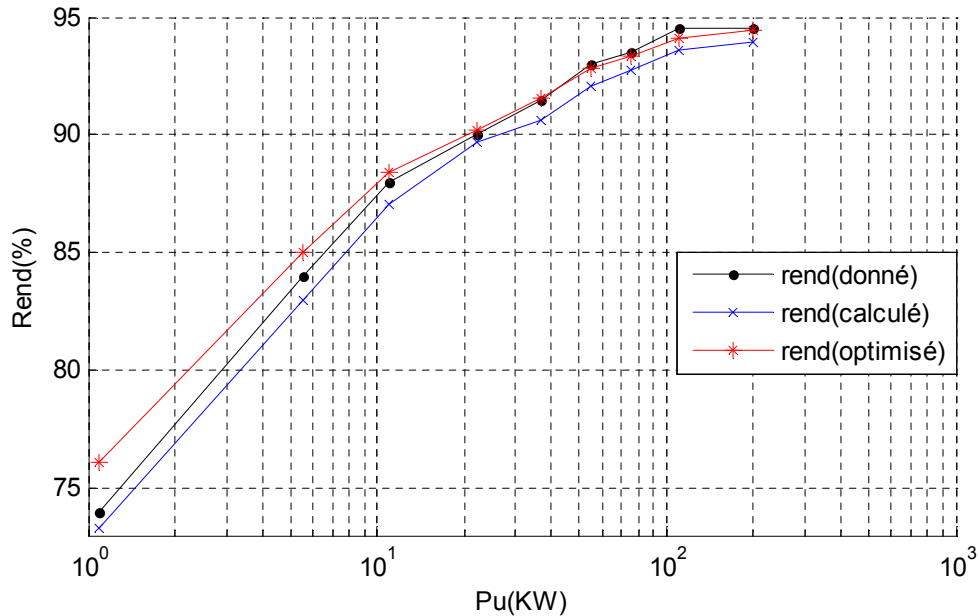


Figure 4.6 Caractéristique  $\eta = f(Pu)$  pour  $P = 3$

#### 4.4 Analyse et interprétation des résultats

Tout d'abord dans cette étude on a commencé par l'exécution du programme de conception, afin de recalculer les rendements des machines de faible, moyenne, et forte puissance avec différents nombres de paires de pôles.

Les tableaux précédents, contiennent les rendements optimisés de ces machines après l'application de l'approche d'AG, ainsi que l'effets de l'induction magnétique, la charge linéaire et finalement la fréquence sur l'amélioration de ces rendements.

A propos des figures, on peut dire qu'elles représentent le rendement donné, calculé, et optimisé en fonction de la puissance utile pour mieux voir si on a réussi à l'amélioration du rendement ou bien non.

A partir de ces résultats on peut constater que :

- ✓ L'augmentation de l'induction magnétique d'entrefer engendre l'amélioration du rendement contrairement l'augmentation de la charge linéaire.
- ✓ Pour obtenir le maximum du rendement, on a besoin d'augmenter la fréquence.
- ✓ L'amélioration du rendement est considérable dans les machines à faible puissance, par contre elle n'est pas intéressante dans les machines à grande et moyenne puissance.

## **4.4 Conclusion**

Dans ce chapitre on a essayé d'améliorer le rendement de la MAS par l'application de l'approche d'AG sur les machines à différentes gammes de puissance.

On a vu dans l'étude précédente l'effet de l'induction magnétique, la charge linéaire et la fréquence sur l'augmentation du rendement.

Finalement, on peut dire comme conclusion principale dans ce chapitre que l'optimisation magnétique dans les MAS est plus intéressante que l'optimisation électrique.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

# Conclusion Générale

L'objectif de ce mémoire est d'appliquer l'approche d'algorithme génétique pour l'amélioration du rendement des machines asynchrones, ainsi que connaître les paramètres qui influent sur ce rendement.

On a procédé en premier temps à une étude théorique sur la machine asynchrone (constitution, principe de fonctionnement, caractéristique mécanique,.....) et on a traité aussi des notions importantes pour mieux comprendre le principe des algorithmes génétiques.

La deuxième partie contient le nectar de ce mémoire qui est l'amélioration du rendement des machines asynchrones de différentes gammes de puissance.

Nous constatons d'après les résultats obtenues qu'on peut améliorer seulement les rendements des machines de faible puissance, par contre nous n'aurons aucune modification à propos de celles de moyenne et forte puissance.

Il faut noter aussi que le choix du matériau constitue le circuit magnétique joue un rôle très important dans l'amélioration du rendement de la machine.

Comme perspectives à la poursuite de notre travail on propose :

- ✓ Voir l'influence d'autres paramètres ;
- ✓ Essayer d'appliquer d'autres méthodes d'optimisation ;
- ✓ Faire une étude économique.

# BIBLIOGRAPHIE

# Bibliographie

- [1] **S. Chemouri, K. Azzouz**, "Contribution à L'étude du Comportement de la Machine Asynchrone Double Alimentation « MADA » Commandée par un Onduleur de Tension MLI ", Mémoire d'ingénieur, Université Med Boudiaf M'Sila, 2005.
- [2] " Les Machines Asynchrones "site d'internete " de[http:// fr.wikipedia-org / wiki / Machine\\_synchrone](http://fr.wikipedia-org/wiki/Machine_synchrone) ".
- [3] **P. Lebrun**, " Machine Asynchrone ", Polycopies de lycée Louis Armand, 173Bd de Strasbourg, 94736 NOGENT sur Marne, (Florence.vadee @ wanaadoo.fr).
- [4] **M.Kostenko, L.Piotroviski**, " Machine Electrique ", Tome 2, Edition Mir Moscou, 1969
- [5] **K. Khalfaoui, S. Harrache**, "Etude et Analyse des Procédés de Démarrage des Moteurs Asynchrones Triphasés ", Mémoire d'ingénieur, Université Med Boudiaf M'Sila, 2006.
- [6] **F. Ziane, F. Zouaou**, " Modélisation et Identification des Machines Asynchrones à Haut Rendement par L'exploitation des Algorithmes Génétiques ", Mémoire d'ingénieur, Université Med Boudiaf M'Sila, 2006.
- [7] **G. Segulier, F. Notelet**, " Electrotechnique Industrielle ". Edition TEC et DOC, (2<sup>ème</sup> édition) 1994.
- "
- [8] **M.Kostenko, L.Piotroviski**, " Machine Electrique ", Tome 1,3<sup>ème</sup> Edition Mir Moscou, 1979
- [9] **Shili. Miloud, Gueddoudj. Ettayeb**, " Conception Assistée par Ordinateur des Machines Asynchrone à Rotor en Court Circuit ", Mémoire d'ingénieur, Université Med Boudiaf M'sila ,2005

- [10] **Fonseca C.M. et Fleming P.J.**, " Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization ", in Genetic Algorithms: Proceedings of the Fifth International Conference, S. Forrest, editeur, San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, juillet 1993. Fonseca C.M. et Fleming P.J., An Overview of Evolutionary
- [11] **A. Khiat, S. Badreddine**, " Algorithmes Génétiques ", Mini Projet. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Institut de Génie Mécanique. Département Productique, Alger.
- [12] **Bäck T. et Hoffmeister F.**, " Global Optimization by Means of Evolutionary Algorithms ", in A.N. Antamoshkin, Editor, Random Search as a Method for Adaptation and Optimization of Complex Systems , p. 17-21, Divnogorsk, ex-URSS, mars 1991.
- [13] **Menozi R. et Piazzzi A.**, " HEMT and HBT Small-Signal Model Optimization Using a Genetic Algorithm ", EDMO'97 , Londres, p.13-18, 24-25 novembre ,1997
- [14] **Beasley D., Bull D.R. et Martin R.R.**, " An Overview of Genetic Algorithms : Part 2, Research Topics ", University Computing , vol. 15, n°4, p. 170-181, 1993b
- [15] **T. Sayoudi, B. Sayoudi, F. Bengueddoudj**, " Conception Assistée par Ordinateur (C.A.O) des Machines Asynchrones par Application des Algorithmes Génétiques ", Mémoire d'ingénieur, Université Med Boudiaf M'Sila, 2006.
- [24] **M. Liwshitz**, " Calcul des machines Electriques ", Tome 1, Tome 2, Edition Dunod, Parie, France, 1967.
- [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, 10-11Dec. 2002, pp. 1- 6.

- [18] **Guy. Olivier, Réal - Paul. Bouchard**, "Circuit et Machines Electriques " , Edition de l'école Polytechnique, Montréal 1995
- [19] **Chen zhengshi, H.-P.Beck, Lu zhen, Wang zhiyong**, " A high Efficiency and Economical Energy AC Speed- Governing Experiment System with Analogue Load " Technical Institute of Electrical Energy, Technology University Clausthal,1997
- [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] **R.Messaoudi, Z.Hemil**, "Contribution à L'étude des Moteur Asynchrones à Haut Rendement ( type EEI , d' azazga) " , Mémoire d'ingénieur, Encadré par M.S Chekroun, Université Med Boudiaf M'sila, 2005
- [22] **F.A.M.Salotti, G. Ceragioli, O.S.Lobosco**, " Energy Saver Motor " , Institut de L'électricité et de L'énergie , Université de Sao paulo -Brazil
- [23] **M. Liwschitz**, " Calcul des Machines Electriques ",Tome 1 , Tome 2 Edition dunod, parie,France 1967
- [24] E.E-I Azazga, Tizi-Ouzou, Algeria, Catalogues des Moteurs Asynchrones (0.18 -400 kW) et Alternateurs (16-180kVA).