

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

UNIVERSITE Med BOUDIAF DE M'SILA  
ACULTE 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**

---

**APPLICATION DES ALGORITHMES GENETIQUES A L'OPTIMISATION DE  
LA CONCEPTION DES MACHINES ASYNCHRONES**

---

Proposé et dirigé par :

Monsieur : M. HAMIMID

Présenté par :

SENOUSSAOUI Hakima Ilham

BERRABAH Aicha

Année Universitaire : 2007 / 2008

**OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE**

**Proposé et dirigé par** : Monsieur : M. Hamimid

**Présenté par** : H. Senoussaoui

A. Berrabah

**Thème :**

**APPLICATION DES ALGORITHMES GENETIQUES A L'OPTIMISATION DE LA  
CONCEPTION DES MACHINES ASYNCHRONES**

**Résumé :**

C'est en 1975 que John Holland parle pour la première fois des algorithmes génétiques, une technique de programmation qui s'inspire du principe de l'évolution des espèces décrit par Darwin, mais ce n'est que récemment (vers le début des années 90) que cette technique arrive sur le devant de la scène, s'inscrivant un peu, avec les techniques liées à la vie artificielle d'une façon plus générale, comme une voie de renouvellement pour le génie logiciel et l'intelligence artificielle (certains préféreront parler d'informatique avancée). On ne s'étonne guère du succès de cette façon de programmer quand on sait que la simplicité de cette technique n'a d'égale que sa puissance. C'est en effet cette légèreté de mise en oeuvre qui fait tout le charme des algorithmes génétiques et qui donne cette impression rafraîchissante d'avoir insufflé un peu de vie et de créativité dans l'ordinateur. Ce seul aspect révolutionnera peut-être la façon que l'on a de voir les machines qui nous entourent.

Ce sujet se propose juste, en attendant une couverture plus ambitieuse, de présenter le principe élémentaire qui est à la base de la programmation génétique, et leurs applications pour la minimisation des pertes dans les machines asynchrones.

**Mots Clés :**

Machines asynchrones, Optimisation, Algorithmes Génétiques.





# remerciements

*Nos remerciements vont premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé, et la patience, qu'il nous a données durant toutes ces années d'étude.*

*Nous exprimons nos profondes gratitudees à nos parents pour leurs encouragements, leur soutien et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.*

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à enseignant **Mr. SALIM CHEKROUN** pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continué tout le long de la réalisation de Ce mémoire, et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils et remarques.*

*Nous tenons à remercier également à vifs remerciements à notre encadreur **Mr. M Hamimid**. Pour son soutien et son aide précieuse dont il a fait preuve.*

*Les mêmes expressions de reconnaissance vont également au chef de département **Mr. BENJAIMA BACHIR** pour les facilités qu'il a mis à notre disposition, dont la gentillesse et gaité était un véritable support pour l'accomplissement de ce projet.*

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du Département d'électrotechnique qui ont contribué à notre formation*

*Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel surtout hacene azzouz et fadila bennadre...*

## Liste de Figure

<b>Fig 1.1</b> Moteur asynchrone.....	<b>3</b>
<b>Fig. 1.2</b> Stator d'une machine asynchrone triphasée .....	<b>4</b>
<b>Fig. 1.3</b> Structure d'un rotor en cage d'écureuil.....	<b>5</b>
<b>Fig 1.4</b> Différentes formes de barres .....	<b>5</b>
<b>Fig. 1.5</b> Tôle utilisée pour la réalisation d'une cage à double encoche.....	<b>6</b>
<b>Fig. 1.6</b> Coupe d'un rotor à cage à encoches profondes.....	<b>6</b>
<b>Fig. 1.7</b> Schéma équivalent de type transformateur.....	<b>8</b>
<b>Fig. 1.8</b> Caractéristique mécanique d'un moteur asynchrone.....	<b>11</b>
<b>Fig. 1.9</b> Bilan énergétique d'un moteur asynchrone.....	<b>18</b>
<b>Fig. 2.1</b> Cycle génétique. ....	<b>23</b>
<b>Fig. 2.2</b> Représentation d'un individu; codage réel (a) codage binaire(b).....	<b>24</b>
<b>Fig. 2.3</b> Opérateur de croisement à un seule de coupure.....	<b>27</b>
<b>Fig. 2.4</b> Opérateur de croisement à deux point de coupure.....	<b>28</b>
<b>Fig. 2.5</b> Opérateur de croisement uniforme.....	<b>28</b>
<b>Fig. 2.6</b> Représentation schématique d'une mutation dans un chromosome.....	<b>29</b>
<b>Fig. 2.7</b> Notion de probabilité de mutation .....	<b>29</b>
<b>Fig. 2.8</b> Allure de la fonction à optimiser .....	<b>31</b>
<b>Fig. 3.1</b> Organigramme de la méthode d'optimisation propos.....	<b>43</b>
<b>Fig 3.2</b> Moyennes et meilleures valeurs de la fonction objective après optimisation en utilisant tôles d'acier(Siemens Martin).....	<b>51</b>
<b>Fig. 3.3</b> Moyennes et meilleures valeurs de la fonction objective après optimisation en utilisant tôles d'acier( 2.3 W/kG).....	<b>52</b>
<b>Fig.3.4</b> Moyennes et meilleures valeurs de la fonction objective après optimisation en utilisant tôles d'acier (3.6W/kG).....	<b>53</b>

# Notation et Symbole

$n_s$	Vitesse de synchronisme ou vitesse du champ tournant	trs/min
$n$	Vitesse rotorique ou vitesse d'exploitation	trs/min
$n_n$	Vitesse nominale	trs/min
$f, f_1$	Fréquence de la montation	Hz
$N$	Nombre des barres d'une cage	
$p$	Nombre de paire de pôle	
$g$	Glissement	%
$P$	Puissance active	W
$Q$	Puissance réactive	W
$T_u$	Couple utile	N.m
$U$	Tension composée	V
$R$	Résistance de conducteur	$\Omega$
$I$	valeur efficace de courant continu ou alternatif	A
$C_n$	Couple nominal	N.m
$C_{éle}$	Couple électromagnétique	N.m
$P_{mec}$	Puissance mécanique	W
$P_{éle}$	Puissance électrique	W
$P_a$	Puissance absorbée	W
$P_u$	Puissance utile	W
$P_{js}$	Pertes joule statorique	W
$P_{jr}$	Pertes joule rotorique	W
$P_{fs}$	Pertes fer statorique	W
$P_{fr}$	Pertes fer rotorique	W
$P_j$	Pertes joule	W
$P_{ve+fr}$	perles par ventilation et par frottement aux paliers	W
$\eta$	Rendement	%
$\rho$	Résistivité du matériau	$\Omega$
$a$	Nombre de voies parallèles	
$L_{moy}$	Longueur moyenne	m
$N_s$	Nombre de spires en série	
$\alpha$	Coefficient caractéristique du matériau	
$E_p$	Epaisseur de peau	m
$\mu$	Perméabilité	Hz
$D_0$	Diamètre du conducteur à section circulaire	m
$d$	Diamètre réduit	m
$R_0$	Résistance du conducteur en courant continu	$\Omega$
$h_{cd}$	Epaisseur du conducteur	m
$h_{cdr}$	Epaisseur réduite du conducteur	
$R_i$	Résistance des termes de série de Fourier	
$f_i$	fréquence des termes de série de Fourier	W
$P_{j1}$	Pertes dues au fondamental du courant	
$K_f$	Coefficient du aux harmoniques	
$K_r$	Coefficient caractéristique de tôle	W
$P_{fer}$	Pertes par effet de Foucault	
$e$	Epaisseur de la tôle	T
$B_m$	Induction maximale	W
$P_h$	Pertes par hystérésis	
$K_h$	Coefficient de pertes par hystérésis	

Tableau de Notation et Symbole

$V_t$	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
$\cos\varphi$	Facteur de puissance	V
$\Omega_s$	Vitesse de synchronisme	
$\Omega_r$	Vitesse angulaire mécanique	rad/s
$E$	Espace de recherche	rad/s
$y$	Fonction du coût	
$h$	fonction de transformation	
$f_j$	fonction d'aptitude de la chaîne $j$	
$f_{moyen}$	Valeur moyenne de la fonction de cout	
$f_{max}$	Valeur maximum de la fonction de cout	
$f_{min}$	Valeur minimale de la fonction de cout	
$R+$	Fitness ou fonction d'évaluation d'individu	
$P_1, P_2$	Parents de la population	
$E_1, E_2$	Enfants de la population	
$L$	Longueur de chromosome	
$K$	Nombre entier	
$P_c$	Probabilité de croisement	
$P_m$	Probabilité de mutation	
$P_s$	Probabilité de sélection	
$N$	Nombre d'individu de la population	
$F$	Nombre d'évaluation totale	
$F$	Fonction simple	
$a, b$	Nombre réel	
$f_{eval}$	Fonction d'évaluation	
$q$	Probabilité cumulative	
$v_j$	Code binaire de chaque chromosome binaire	
$x$	Valeur décimale	
$V_1, V_2,$	Nombre généré aléatoirement	
$V_3, V_4$	Vecteur de la génération initiale en binaire	
$V_1$	Tension statorique simple	
$P_s$	Puissance apparent	V
$N_1, N_2$	Nombre de spire par phase rotorique et statorique	W
$\Phi$	Flux par pôle	
$B_\delta$	L'induction dans l'enterfer	Wb
$A_1$	Densité linéaire de courant	T
$p \tau$	Pas polaire	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	
$m_1, m_2$	Nombre de phase primaire et secondaire	
$F.M.M$	Force magnétomotrice totale	
$I_1, I_2$	Valeur efficace du courant primaire et secondaire	At A Hz

$\lambda$	Rapport	
$\beta$	rapport du raccourcissement	
y	L'ordre d'harmonique	
H	Intensité du champ magnétique	A/m
F	F.M.M nécessaire pour l'excitation de la machine	At
H <sub>i</sub>	Induction Intensité du champ pour chaque tronçon	A/m
F <sub>i</sub>	Tension magnétique pour chaque tronçon	At
H <sub>δ</sub>	Intensité du champ dans l'entrefer	A/m
δ	Entrefer	m
'δ	Entrefer fictif	m
F <sub>δ</sub>	Force magnétomotrice dans l'entrefer	At
K <sub>f</sub>	Facteur de forme de la courbe d'induction	
K <sub>s</sub>	Coefficient de saturation	
Φ <sub>δ</sub>	Flux dans l'entrefer	Wb
Hσ	Représente une constante du matériau utilisé	
wσ	Constance du fer	
τ <sub>z1</sub> ,	Pas dentaire statorique et rotorique	m
F <sub>z1</sub> , F <sub>z2</sub>	Force magnétomotrice au dent statorique et rotorique	At
F <sub>j1</sub> , F <sub>j2r</sub>	Force magnétomotrice dans la culasse statorique et rotorique	At
I <sub>2bar</sub>	Courant de la barre	A
h	Hauteur (au pro fendeur) d'encoche	m
h <sub>z1</sub> , h <sub>z2</sub>	Profondeur de la dent statorique et rotorique	m
δ	Résistivité	
H <sub>j1</sub> , H <sub>j2</sub>	Champ magnétique dans la culasse statorique et rotorique	A/m
H <sub>z1</sub> , H <sub>z2</sub>	Champ magnétique dans la dent statorique, rotorique	A/m
R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub>	Résistance statorique et rotorique par phase	Ω
R <sub>2'</sub>	Résistance totale d'une phase secondaire ramenée au primaire	Ω
R <sub>bar</sub>	Résistance de barre	Ω
I <sub>bar</sub>	Courant de la barre	A
I' <sub>2</sub>	Courant de barre ramenée au primaire	A
L <sub>bar</sub>	Longueur d'une barre	m
R <sub>an</sub>	Résistance de anneau	Ω
d <sub>b</sub>	Diamètre de barre	m
L <sub>a</sub>	Longueur de la machine	m
S <sub>t</sub>	Désigne l'épaisseur de la tôle du fer	m
P <sub>F</sub>	Pertes par courant de Foucault	W
P <sub>h</sub>	Pertes Hystérésis et de Foucault	W
P <sub>hz</sub>	Pertes d'Hystérésis dans les dents d'encoche statorique	W
D <sub>e</sub>	Diamètre extérieur de la culasse	m
m <sub>i</sub>	Masse de la culasse	Kg
m <sub>z</sub>	Masse totale des dents	Kg
K <sub>wj</sub>	Masse d'une dent	Kg
1m	Nombre des phases	



# SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....1

## CHAPITRE1:GENERALITE SUR LES MACHINES

### ASYNCHRONES

1.1 INTRODUCTION.....3

1.2 CONSTITUTION DES MACHINES ASYNCHRONES.....3

    1.2.1 Le stator.....4

    1.2.2 Le rotor.....4

        1.2.2.1 Rotor à cage.....6

        1.2.2.2 A double cage.....6

        1.2.2.3 A double encoche ou à encoches profondes.....6

        1.2.2.4 A bague.....7

1.3PRINCIPESGENERAUX .....8

1.4 SCHEMA EQUIVALENT DE LA MACHINE ASYNCHRONE.....8

1.5 GLISSEMENT D'UNE MACHINE ASYNCHRONE.....9

1.6 CARACTERISTIQUE DE FONCTIONNEMENT.....10

    1.6.1 Fonctionnement à vide.....10

1.6.2 Fonctionnement en charge..	10
1.6.3 La caractéristique mécanique.....	11
<b>1.7 LES PERTE DANS LES MACHINES ASYNCHRONES.....</b>	<b>12</b>
1.7.1 Les pertes électriques.....	12
1.7.1.1 Pertes normales en basse fréquence.....	12
1.7.1.2 Perte supplémentaire à fréquence élevé.....	13
1.7.2 Les pertes magnétiques de fer.....	14
1.7.2.1 Les pertes par courant de Foucault.....	14
1.7.2.2 Les pertes par hystérésis.....	15
1.7.3 Les pertes mécaniques.....	15
1.7.3.1 Les pertes par ventilation.....	15
1.7.3.2 Les pertes par frottement dans les palies.....	16
1.7.3.3 Les pertes par frottement dans les roulements.....	16
1.7.3.4 Les pertes aérodynamiques.....	17
1.7.4 Les pertes complémentaires.....	17
<b>1.8 BILAN ENERGETIQUE.....</b>	<b>18</b>
<b>1.9 CONCLUSION.....</b>	<b>19</b>

## **CHAPITRE 2:PRINCIPE DES ALGORITHME GENETIQUE**

2.1INTRODICTION.....	20
2.2 DEFINITION.....	20
2.3 CARACTERISTIQUE DE L'AG.....	21
2.4 TREMINOLOGIE ET ELEMENTS DE BASE.....	21
2.5 FONCTIONMENET DE AGs.....	22

<b>2.6 LES DIFFERENTS OPERATEURS DE L'AG.....</b>	<b>23</b>
2.6.1 Le codage.....	23
2.6.2 Génération de la population initiale.....	24
2.6.2.1 Taille d'une population.....	24
2.6.3 Evolution (fitness).....	25
2.6.4 Sélection .....	25
2.6.4.1 Sélection par roulette biaisée (sélection sur la fitness).....	25
2.6.4.2 Sélection par tournoi.....	26
2.6.4.3 Sélection par élitisme.....	26
2.6.4.4 Sélection par troncature.....	26
2.6.5 Le croisement .....	26
2.6.5.1 Croisement à un point .....	27
2.6.5.2 Croisement multipoint.....	27
2.6.5.3 Croisement uniforme.....	28
2.6.6 La mutation .....	29
2.6.6.1 Probabilité de mutation.....	29
2.6.7 Critère d'arrêt.....	30
<b>2.7 Application d'optimisation par AGS.....</b>	<b>30</b>
2.7.1 Procédure de maximisation par algorithme génétique.....	30
2.7.2 Exemple d'application .....	31
<b>2.8 CONCLUSION .....</b>	<b>34</b>

### **CHAPITRE 3: OPTIMISATION DE LA CONCEPTION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR L'AGs**

<b>3.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>36</b>
<b>3.2 MOTEUR ASYNCHRONE À HAUT RENDEMENT.....</b>	<b>36</b>

<b>3.3 CARACTÉRISTIQUES DES MOTEURS À HAUT RENDEMENT.....</b>	<b>37</b>
<b>3.4 LE RENDEMENT D'UN MOTEUR ASYNCHRONE .....</b>	<b>38</b>
<b>3.5 EVALUATION DU RENDEMENT D'UNE MACHINE ASYNCHRONE.....</b>	<b>39</b>
<b>3.6 NORMES ET METHODE D'EVALUATION LE RENDEMENT.....</b>	<b>39</b>
<b>3.6.1 IEEE 112-B.....</b>	<b>40</b>
<b>3.6.2 IEC 60034-2.....</b>	<b>40</b>
<b>3.6.3 JEC 37.....</b>	<b>40</b>
<b>3.7 METHODE DE MESURE.....</b>	<b>41</b>
<b>3.7.1 Méthode 1.....</b>	<b>41</b>
<b>3.7.2 Méthode 2.....</b>	<b>41</b>
<b>3.7.3 Méthode 3.....</b>	<b>41</b>
<b>3.7.4 Méthode 4.....</b>	<b>41</b>
<b>3.7.5 Méthode 5.....</b>	<b>41</b>
<b>3.8 TECHNIQUES D'AUGMENTATION DU RENDEMENT DES MOTEURS ASYNCHRONES.....</b>	<b>42</b>
<b>3.9 AMELIORATION DU RENDEMENT D'UNE MAS PAR L'APPLICATION DES AGS.....</b>	<b>42</b>
<b>3.9.1 Méthode de conception.....</b>	<b>43</b>
<b>3.9.1.1 Calcul preliminaries .....</b>	<b>43</b>
<b>3.9.1.2 Dimensions principaux de la machine .....</b>	<b>45</b>
<b>3.9.1.3 Choix de l'entrefer.....</b>	<b>45</b>
<b>3.9.1.4 Calcul de la FMM.....</b>	<b>45</b>
<b>3.9.1.5 Coefficient de saturation .....</b>	<b>46</b>
<b>3.9.1.6 Les pertes.....</b>	<b>46</b>
<b>3.9.1.6.1 Pertes dans le cuivre ou pertes joule de la machine.....</b>	<b>46</b>
<b>3.9.1.6.2 Pertes dans le fer.....</b>	<b>47</b>

<b>3.9.1.7 Le rendement.....</b>	<b>50</b>
<b>3.10 conclusion .....</b>	<b>55</b>

## **Introduction générale**

La machine asynchrone, connue également sous le terme (anglo-saxon) de la machine à induction. Est une machine électrique à courant alternatif. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui le traversent. On la retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications industrielles ou domestiques de l'électricité, du fait de sa facilité d'installation, de son bon rendement et de son excellente fiabilité. Il existe plusieurs types de moteurs asynchrone : monophasé, triphasé à cage, triphasé à bague.

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

La caractérisation des machines asynchrones nous entraîne à formuler une méthode de dimensionnement qui s'appuie sur les équations de la machine en tenant compte des divers phénomènes électromagnétiques et aboutit à une définition globale de la machine.

Le dimensionnement définitif, tel qu'il est pratiqué en utilisant les logiciels de CAO les plus courants, est ensuite décrit en exploitant les spécificités destinées aux machines asynchrones. Ce qui conduit au lancement d'importants travaux à travers le monde, particulièrement pour l'amélioration de leur rendement, cela est principalement dû à la place qu'elles occupent.

En pratique, on observe aujourd'hui que les algorithmes génétiques se sont révélés les plus performants pour la résolution de problème. D'une part, ils permettent de conserver des profils de trajectoires réalistes. On ne peut néanmoins envisager l'application opérationnelle concrète de tels algorithmes.

Dans le cadre de cette problématique de recherche, un mémoire a été initié au sein du département d'électrotechnique de M'sila en vue de développer des programmes dans l'environnement permettant l'analyse des différents méthodes d'optimisations.

Pour atteindre ces objectifs, ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre décrit la machine asynchrone, son principe de fonctionnement, ses constituants et son bilan de puissance ;

Dans le second chapitre, nous traiterons l'analyse des performances des algorithmes génétiques ;

Nous aborderons de façon détaillée dans le troisième chapitre le concept des machines à haut rendement, les normes et méthodes d'évaluations de ce dernier seront également analysées. A la fin de ce chapitre, nous présenterons une approche d'amélioration du rendement en utilisant l'optimisation de la conception assistée par les algorithmes génétiques.

# ***INTRODICTION GENERALE***



**CHAPITRE 1**  
**GENERALITE SUR LES MACHINES ASYNCHRONES**

## 1.1- Introduction

La paternité de la machine asynchrone est controversée. Elle pourrait être attribuée à trois inventeurs : en 1887, Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone, puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets. Pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1888<sup>3</sup>. En 1889, Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de 1891.

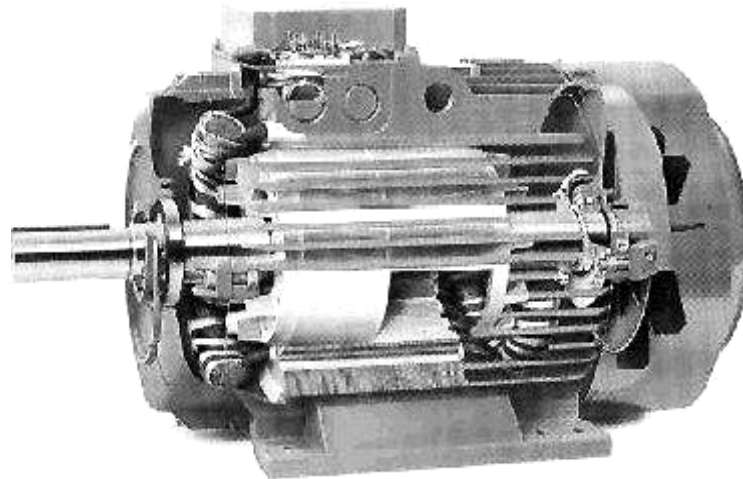
Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et son faible prix de revient, la machine asynchrone est aujourd'hui très couramment utilisée comme moteur dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatt.

Quand la machine asynchrone est alimentée par un réseau à fréquence fixe, il est difficile de faire varier sa vitesse. En outre, au démarrage, le couple est faible et le courant appelé est très élevé. Deux solutions historiques ont résolu ce dernier problème : le rotor à encoches profondes et le rotor à double cage découvert en 1912 par Paul Boucherot. Grâce aux progrès de l'électronique de puissance, l'alimentation par un onduleur à fréquence variable, permet maintenant de démarrer la machine convenablement et de la faire fonctionner avec une vitesse réglable dans une large plage, [1].

## 1.2- Constitution des machines asynchrones

La machine se compose de deux parties principales :

- Le stator, partie fixe de la machine ou est connectée à l'alimentation électrique ;
- Le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.



**Fig. 1.1** Moteur asynchrone

### 1.2.1-Le stator

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.

Il est courant de réaliser une protection contre les échauffements anormaux des bobinages en plaçant au cœur de ceux-ci soit un disjoncteur thermique, soit un capteur de température, ceci afin de couper l'alimentation électrique en cas de dépassement d'un seuil déterminé de température.

Afin de réaliser le branchement du moteur au réseau, toutes les connexions sont regroupées dans un boîtier, généralement appelé par les électriciens, plaque à bornes. On y retrouve donc six connexions pour les enroulements statoriques, plus éventuellement celles du capteur de température, [2].



Fig. 1.2 Stator d'une machine asynchrone triphasée

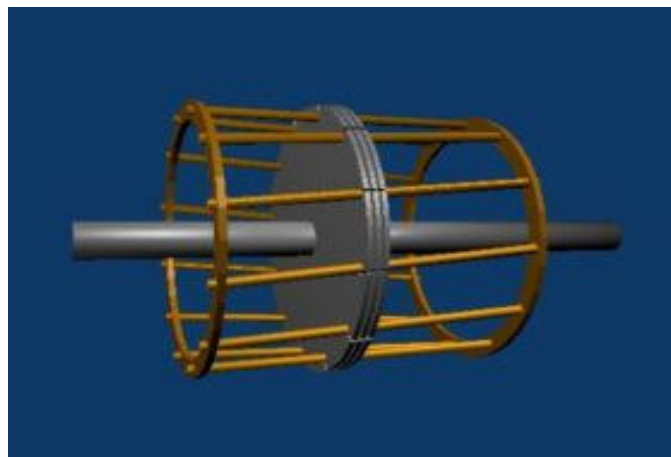
### 1.2.2-Le rotor

Le rotor quant à lui représente la partie tournante de la machine et le plus souvent la partie induite c'est-à-dire la partie dans la quelle sont induits les courants électriques par le fait du champ magnétique du stator. la partie magnétique du rotor est constituée, comme celle du stator, d'un empilement de tôles ferromagnétiques dans la quel est entreposé le circuit électrique qui peut être composé soit d'un bobinage électrique (bobiné), soit de barre d'aluminium (en court-circuit ou à cage d'écureuil).

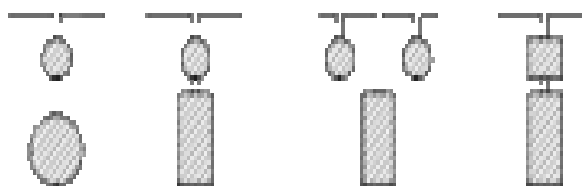
On peut distinguer 4 types de rotor :

### 1.2.2.1- Rotor à cage

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 par deux anneaux de court-circuit (voir figures ci-contre). Les tôles ferromagnétiques servent à guider les lignes de champ tandis que les barres accueillent les courants induits. Pour les moteurs de faible puissance, les rotors sont réalisés à partir d'un empilement de tôles découpées et isolées les unes des autres (feuilletage) dans lesquelles on injecte un matériau conducteur de manière à constituer les barres ainsi que les anneaux de court-circuit. Pour les moteurs de forte puissance, les barres sont insérées dans le rotor puis les anneaux de court-circuit sont soudés ou brasés aux barres. Le matériau constituant les barres et les anneaux de court-circuit est 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 présentes sous une phase statorique soit constant quelle que 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 barres plus anneaux de court-circuit la forme d'une cage d'écureuil déformée, [1, 2].



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



**Fig. 1.4** Différentes formes de barres

### 1.2.2.2- À double cage

Le rotor est construit suivant le principe du rotor à cage simple, mais avec deux cages électriquement indépendantes. Une cage externe à la périphérie du rotor est composée de matériaux résistifs (laiton, bronze) et possède une faible dispersion magnétique. Une cage interne en cuivre possède une résistivité plus faible et une dispersion magnétique importante. La cage externe, surtout active au démarrage, permet d'obtenir un couple plus important dans cette phase de fonctionnement, tandis qu'à régime nominal la cage interne permet de retrouver les caractéristiques d'un rotor à simple cage, [3].



Fig. 1.5 Tôle utilisée pour la réalisation d'une cage à double encoche

### 1.2.2.3- À double encoche ou à encoches profondes

Ce sont des rotors à cage qui utilisent l'effet de peau dans les conducteurs afin de faire varier la résistance du rotor en fonction de la vitesse de fonctionnement de la machine. L'effet de peau est un phénomène électromagnétique qui fait que plus la fréquence des courants augmente, plus le courant a tendance à ne circuler qu'en surface des conducteurs, [3].



Fig. 1.6 Coupe d'un rotor à cage à encoches profondes

---

---

Ainsi, au démarrage, la fréquence des courants rotoriques 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 rotoriques 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).

#### 1.2.2.4- À bague

Le rotor d'une machine à bague est constitué de trois 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 hypo synchrone. Le coût élevé et l'apparition des variateurs de fréquence ont rendu obsolète ce type de machine, [4].

### 1.3- Principes généraux

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 rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux : loi de Lenz. Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique.

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, vu dans le référentiel du rotor, il n'y aurait pas de variation de champ magnétique ; les courants s'annuleraient, de même que le couple qu'ils produisent, et la machine ne serait 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 (fonctionnement hypersynchrone) 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 rotoriques, [3, 4].

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.

#### 1.4- Schéma équivalent de la machine asynchrone

La machine asynchrone est présentée par plusieurs modèles, le schéma équivalent de la machine asynchrone à simple cage d'écuriel sans pertes fer le plus proche du modèle physique est celui du type transformateur ramené au stator dans lequel les fuites statoriques et rotoriques sont représentées séparément, comme illustré par la Fig. 1.7.

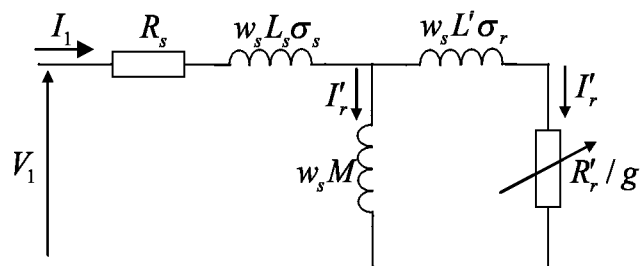


Fig. 1.7 Schéma équivalent de type transformateur

Ce schéma est obtenu grâce à une transformation de Park de l'ensemble des grandeurs électriques du système triphasé (réelle). Composé de deux circuits couplés électromagnétiquement en grandeurs équivalentes en système biphasé, sous les hypothèses simplificatrices suivantes:

- ❖ Le circuit magnétique n'est pas saturé ;
- ❖ Les inductances mutuelles entre deux enroulements varient sinusoïdalement, en fonction de l'angle entre les axes magnétique ;
- ❖ L'enterrer est constant, [5].

## I-5 Glissement d'une machine asynchrone

Le glissement est une grandeur qui rend compte de l'écart de vitesse de rotation d'une machine asynchrone par rapport à une machine synchrone hypothétique construite avec le même stator.

Le glissement est toujours faible, de l'ordre de quelques 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. Les pertes par effet Joule dans le rotor étant proportionnelles au glissement, une machine de qualité se doit de fonctionner avec un faible glissement, [4, 5].

On désigne par  $n_s$  la fréquence de rotation du champ statorique dans la machine ;

On désigne par  $n$  la fréquence 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 :

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (1,1)$$

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

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

Le glissement peut aussi être calculé à partir des vitesses angulaires :

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (1,3)$$

Avec :

$\omega_s$  Vitesse angulaire de synchronisme du champ statique dans la machine ;

$\omega$  Vitesse angulaire de rotation de la machine.

---

---

## 1.6- Caractéristique de fonctionnement

### 1.6.1- Fonctionnement à vide

Lorsque le moteur tourne à vide, le courant est entre 50% et 20% du courant de pleine charge. Ce courant est semblable au courant d'excitation d'un transformateur. Ainsi, il est composé en majeure partie d'un courant magnétisant qui produit le flux tournant  $\phi_m$  et d'une faible composante active pour fournir les pertes par frottement et aération. Plus les pertes dans le fer. Le flux  $\phi_m$  accroche le rotor et le stator ; par conséquent, il est semblable à un flux mutuel.

La puissance réactive requise pour créer le champ tournant est donc considérable et, afin de la réduire, lorsqu'un moteur asynchrone fonctionne à vide, le flux crée est essentiellement un mutuel  $\phi_m$ . A cause de la présence de l'entrefer, une puissance réactive considérable est requise pour produire ce flux.

On amène à utiliser un entrefer aussi petit que possible, en tenant compte des tolérances mécanique acceptable.

- Le facteur de puissance à vide est compris entre 20% pour les petits moteurs et 5% pour les gros.

- le rendement est nul, car la machine ne débite aucune puissance utile, [5].

### 1.6.2- Fonctionnement en charge

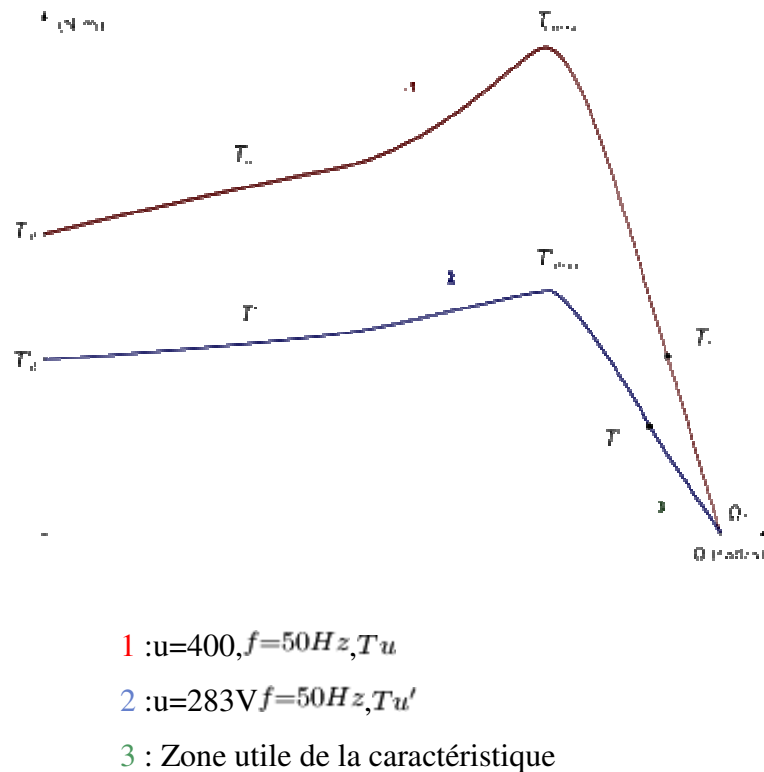
Le moteur est en charge, le courant circulant dans le rotor produit une FMM qui tend à s'opposer à celle créée par le stator. Ces FMM sont très semblables à celles produites par le primaire et le secondaire d'un transformateur sous charge. Par conséquent, en plus du flux mutuel  $\phi_m$ , des flux fuite  $\phi_{f2}$  et  $\phi_{f1}$  sont créés.

Lorsque le moteur fonctionne en charge, la puissance réactive (kVAR) requise pour produire ces trois flux est légèrement supérieure à celle absorbée à vide. Par contre. La puissance active (kW) absorbée par le moteur varie proportionnellement avec la charge mécanique. Il s'ensuit que le facteur de puissance du moteur (kW / kVA) s'améliore à mesure que la charge croit: à pleine charge, il est compris entre 80% pour les petits moteurs et 90% pour les gros. Le rendement à pleine charge est particulièrement élevé; il peut atteindre 98% pour les machines.

A pleine charge, le flux mutuel  $\phi_m$  diminue mais des flux de fuites sont créés par le rotor et le stator, [6].

### 1.6.3- La caractéristique mécanique

La caractéristique mécanique est la représentation de  $T_u = f(\Omega)$



**Fig. 1.8** Caractéristique mécanique d'un moteur asynchrone

- Cette courbe montre que le moment du couple utile est important au démarrage, la machine peut démarrer en charge ;
- Le couple utile présente un maximum  $\widehat{T}_u$  ;
- Le glissement est maximum ( $g=1$ ) au démarrage ;
- On peut trouver une zone quasi-linéaire au voisinage de la fréquence de rotation nominale. Comme cette zone correspond au fonctionnement normal, nous chercherons l'équation de la caractéristique de la forme :  $T_u = a \cdot \Omega + b$ .

Avec la définition du glissement, on trouve que dans cette zone le moment du couple utile est proportionnel au glissement :  $T_u = k \cdot g$

- On remarque que si on diminue la valeur de la tension d'alimentation par  $\sqrt{2}$ , le moment du couple est divisé par 2. On retiendra que dans la zone utile, le moment du couple est proportionnel au carré de la tension d'alimentation :  $T_u = \alpha U^2$ , [7].

## 1.7- Les Pertes dans les machines asynchrones

Les moteurs asynchrone 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 statoriques et électrique, 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, [8].

### 1.7.1- 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.

#### 1.7.1.1- Pertes normales en basse fréquence

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

$$P_j = R I^2 \quad (1, 4)$$

Les pertes par effet joule sont :

- a) pertes par effet joule dans les enroulements statoriques ;
- b) pertes par effet joule dans les enroulements rotorique.

En basse fréquence et pour les conducteurs de section filiforme, la densité de courant est uniformément répartie dans toute la section du conducteur. La résistance d'un enroulement, réalise à l'aide de fils fin, [4].

$$R_0 = \rho \cdot \frac{L_{moy} \cdot N_s}{a \cdot s} \quad (1, 5)$$

Ou :

$\rho$  Résistivité ;

$a$  Nombre de voies parallèles ;

$L_{moy}$  Longueur moyenne ;

$N_s$  Nombre de spires en série.

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

$$\rho(\theta_2) = \rho(\theta_1) \frac{1 + \alpha \cdot \theta_2}{1 + \alpha \cdot \theta_1} \quad (1, 6)$$

$\alpha$  Coefficient caractéristique du matériau, [8].

### 1.7.1.2- Pertes supplémentaires à fréquence élevée

#### ▪ Cas des courant sinusoïdaux

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

$$E_p = \sqrt{\frac{\rho}{2 \cdot \mu \cdot f}} \quad (1, 7)$$

La résolution des équations de Maxwell conduit aux expressions simplifiées suivantes pour des conducteurs dans l'air.

❖ Pour un conducteur à section circulaire de diamètre  $D_0$  : on introduit le diamètre réduit :

$$d = \frac{D_0^2}{4 \cdot E_p} \quad (1, 8)$$

Si  $R_0$  est la résistance du conducteur en courant continu, la résistance effective  $R$  est donnée, de façon approchée.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } d < 1 \text{ par } R = R_0 \cdot \left( 1 + \left( \frac{3}{4} d \right) \right) \\ \text{Si } d > 1 \text{ par } R = R_0 \cdot \left( 1 + \frac{1}{4} + \frac{3}{64d} \right) \end{array} \right. \quad (1, 9)$$

$$(1, 10)$$

❖ Pour un conducteur à section rectangulaire plate, pour un tel conducteur, lorsque la largeur est nettement supérieure à l'épaisseur  $h_{cd}$ , On introduit l'épaisseur réduite :

$$h_{cdr} = \frac{h_{cd}}{E_p} \quad (1, 11)$$

On obtient alors :

$$R = R_0 \cdot \frac{(sh(2h_{cdr}) + \sin(2h_{cdr}))}{(ch(2h_{cdr}) - \cos(2h_{cdr}))} \quad (1, 12)$$

#### ▪ Cas des courant non sinusoïdaux

Pour les courants alternatifs non sinusoïdaux, les conducteurs étant généralement de matériaux à caractéristiques linéaires, il suffit de calculer la résistance  $R_i$  correspondant à chaque

fréquence  $f_i$  des termes de série de Fourier composant le courant et d'additionner les pertes dues à chaque harmonique sous la forme :

$$P_j = \sum_{i=1}^n R_r I_i^2 = R_0 I_1^2 \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{R_0} \left( \frac{I_i}{I_1} \right)^2 = P_{j1} K_f \quad (1, 13)$$

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

$K_f$  Coefficient du aux harmoniques (pour des courant en créneaux,  $K_f$  est de l'ordre de 8 à 10 %).

## 1.7.2- 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 courants de Foucault, [9].

### 1.7.2.1- Les pertes par courant de Foucault

Dans ces alliages résultent, selon la loi de Faraday, des variations temporelles des flux qui induisent des force électromotrices, dans leurs masses. Ces f.é.m générées 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 des 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 courants de Foucault par la relation :

$$P_f = K_f (e \cdot f \cdot B_m^2) \quad (1, 14)$$

Avec :

$P_f$  Pertes par effet de Foucault ;

$e$  Epaisseur de la tôle ;

$f$  Fréquence de l'induction (Hz) ;

$B_m$  Induction maximale à la fréquence  $f$  (T) ;

$K_f$  Coefficient caractéristique de tôle.

### 1.7.2.2- 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  $50 \mu m$  (soit environ  $10^3$  longueurs de domaines).

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

$$P = K_h \cdot f \cdot B_m^2 \quad (1, 15)$$

Avec :

$K_h$  Coefficient de pertes par Hystérésis.

### 1.7.3- Les pertes mécaniques

Les pertes mécanique sont dues aux frottement :

- 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 factures et il est très difficile de prédire leur valeur. Pour les déterminer avec exactitude, il faut faire des essais sur la machine, [4].

#### 1.7.3.1- 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  $\eta_v$  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, [5].

### 1.7.3.2- 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 suivant donne la somme des pertes par ventilation et par frottement aux paliers (en W) :

$$P_{v+p} = 0,3 \text{ à } 0,7 (P_u V_t^2 10^{-5}) \quad (1.16)$$

Avec :

$P_u$  (W) Puissance utile de la machine ;

$V_t$  (m/s) Vitesse tangentielle du rotor, [4].

### 1.7.3.3- Les pertes par frottement dans les roulements

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

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

Ces frottements dépendent de nombreux facteurs :

- Type de lubrification (graisse, barbotage ou injection d'huile) ;
- Viscosité, voir la rhéologie (Viscosité élasticité) du lubrifiant ;
- Type de géométrie interne du roulement.

- Charge et vitesse de rotation auxquelles les roulements sont soumis.

L'évaluation des pertes par frottement dans les roulement 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 employée lorsque les roulement sont sollicités sous des conditions très sévères, par exemple dans l'aéronautique, cette méthode est très lourde à mettre en œuvre, ne sera pas abordée dans ce travail, [4].

#### 1.7.3.4- 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.

#### 1.7.4- Les pertes complémentaires

Elles forment un groupe de pertes spéciales, se sont :

- a) Les pertes complémentaires dans le cuivre ;
- b) 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 supérieur 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  $f_{d1} = Z_2 n$  et la fréquence de pulsations dans le rotor  $f_{d2} = Z_1 n$ , 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, [6].

## 1.8- Bilan énergétique

La figure 1.9, représente les différentes puissances et les pertes de la machine asynchrone.

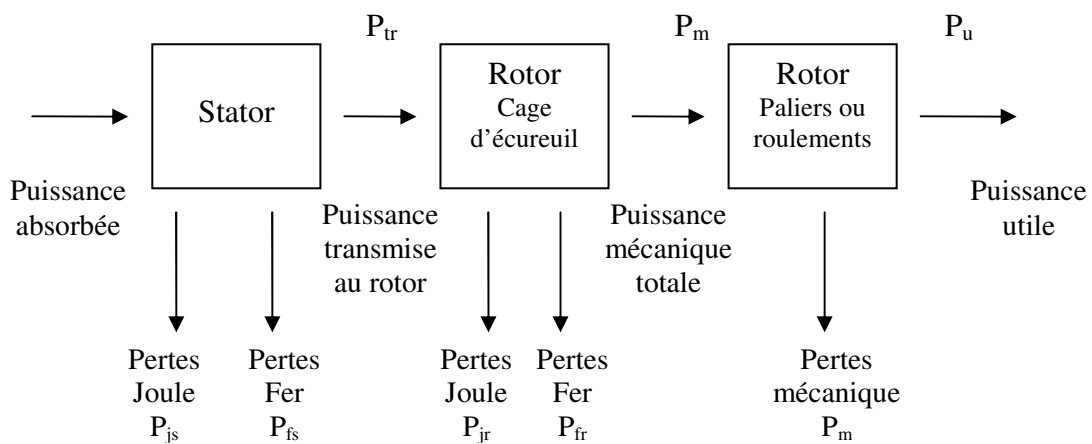


Fig. 1.9 Bilan énergétique d'un moteur asynchrone

- Puissance absorbée :  $P_a = \sqrt{3}.U.I.\cos\varphi$ 
  - Pertes : - Joule stator :  $P_{js} = (3/2).R.I^2$  (avec  $R$  entre deux borne)
  - Fer stator :  $P_{fs}$
  - Mécanique :  $P_m$
- Pertes : - Joule rotor :  $P_{jr} = (3/2).R.I^2$ 
  - Fer rotor :  $P_{fr}$
- Puissance utile :  $P_u = \sqrt{3}.U.I.\cos\varphi - \text{pertes}$
- Puissance transmise au rotor :  $P_{\text{éle}} = P_u - \text{pertes stator} = P_a - P_{js} - P_{fs}$  (1, 17)

Cette puissance est transmise au rotor par le couple électromagnétique développé grâce au champ tournant d'où :

$$C_{em} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s} \quad (1, 18)$$

- Ce couple est aussi celui du rotor d'où :

$$P_m = C_m \cdot \Omega_r \quad (1, 19)$$

- Pertes joule rotorique :

La différence des deux puissances stator et rotor est perdue par effet dans le rotor à cause du glissement.

$$p_{jr} = P_{tr} - P_m = C_{em} (\Omega_s - \Omega_r) \quad (1, 20)$$

$$g = \frac{(\Omega_s - \Omega_r)}{\Omega_s} \quad (1, 21)$$

$$\text{Alors : } P_{jr} = C_{em} \cdot g \cdot \Omega_s = g \cdot P_{tr} \quad (1, 22)$$

Les pertes joules rotor sont égales au produit du glissement par la puissance transmise.

## 1.9- Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la constitution générale d'une machine asynchrone, son principe de fonctionnement et ses caractéristiques. On terminera avec les différentes catégories de pertes existantes dans la machine. Le deuxième chapitre est consacré au principe des algorithmes génétiques.

# **CHAPITRE 2**

## **PRINCIPE DES ALGORITHME GENETIQUE**

## 2.1- Introduction

Trouver la solution optimale d'un problème dans un espace complexe implique un compromis entre deux objectifs : l'exploitation des meilleures solutions et l'exploration robuste de l'espace de recherche. Les méthodes de type grimpeur procèdent itérativement en tentant, à chaque pas, de trouver localement une solution intermédiaire meilleure que la solution courante ; ce genre de méthode est pénalisée par son incapacité à traiter des problèmes représentant des reliefs de solution multimodales (système possédant plusieurs optimaux locaux).

Un algorithme génétique (GA) est une technique de recherche employée en informatique pour trouver les solutions approximatives à l'optimisation. Les algorithmes génétiques sont une classe particulière des algorithmes évolutionnaire qui emploient des techniques inspirées de la biologie évolutionnaire telle que la mutation, la sélection, et la recombinaison (ou le croisement).

Les algorithmes génétiques (AG) représentent une stratégie de recherche réalisant un compromis équilibré entre l'exploitation de l'espace de recherche et l'exploitation des meilleures solutions. Des analyses théoriques ont montré que les algorithmes génétiques gèrent ce compromis de façon optimale.

Le but de ce chapitre, est de présenter le principe de la méthode d'optimisation basée sur l'AG, son fondement ainsi que les différentes étapes nécessaires à son développement, pour finir en fin avec la recherche de solutions optimales d'une application simple qui facilitera la compréhension de ces algorithmes, [10].

## 2.2- Définition

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

Cette technique constitue une méthode d'optimisation robuste. L'AG peut résoudre, avec faiblesse, des fonctions représentant des reliefs de solution réputés très difficiles pour les méthodes d'optimisation classiques 'simples, le plus fort gradient ....' Les fonctions réputées difficiles sont des fonctions à plusieurs dimensions où les méthodes ordinaires ne peuvent pas prendre en compte l'effet d'interaction entre tous les paramètres, [10].

---

---

### 2.3- Caractéristiques de l'AG :

Les principales caractéristiques relatives à ces techniques se concentrent autour des trois points :

1- Le parallélisme : l'algorithme génétique travaille en parallèle sur un certain nombre de candidats et non pas sur un candidat unique. La méthode de recherche est globale et couvre tout l'espace de recherche.

2- L'utilisation minimale d'information : il n'a besoin de la mesure d'adéquation (la qualité d'une solution) il repose sur aucune autre information, par exemple des dérives ou hypothèses telles que la continuité et la différenciatrice. Il ne requiert qu'une capacité à classer les solutions entre elles.

3- L'utilisation de règles probabilistes plutôt que déterministes dans l'exploitation de l'espace de recherche, l'introduction du hasard est très bénéfique pour l'optimisation de fonction pressants plusieurs optima et aussi en cas de fonction non permanente (déplacement ou changement des optima au cours du temps), [11].

### 2.4- Terminologie et éléments de base :

Un algorithme génétique recherche les extrêmes d'une fonction définie sur un espace de données appelé *population*. Par analogie avec la génétique, chaque individu de cette population est un chromosome et chaque caractéristique de l'individu est un gène. Dans un cas simple, un gène sera représenté par un bit (0 ou 1), un chromosome par une chaîne de bit. Chaque gène représente une partie élémentaire du problème, il peut être assimilé à une variable et peut prendre des valeurs différentes appelées allèles. La position du gène dans le chromosome se nomme locus.

On parle également de génotype. Le génotype représente l'ensemble des valeurs des gènes des chromosomes alors que le phénotype représente la solution réelle après transformation du chromosome. Lors de la génération d'une nouvelle population, des opérateurs génétiques tels que la sélection, le croisement et la mutation sont nécessaires pour la manipulation des chromosomes.

Le "tableau. 2.1" présente une récapitulation de la terminologie naturelle et celle utilisée par les algorithmes génétiques, [10, 11].

Nature	Algorithmes génétiques
Chromosome	Chaîne
Genet	Trait, caractéristiques
Allèle	Valeur de la caractéristique
Locus	Position dans la chaîne
Génotype	Structure Ensemble des valeurs des gènes
phénotype	Ensemble des paramètres, structure décodée Evaluation d'un génotype

**Tab. 2.1** Comparaison de la terminologie naturelle et celle des algorithmes génétiques.

Les AGs utilisent donc un vocabulaire à celui de la génétique. On parlera ainsi d'individus ou chromosome dans une population. Chaque individu ou chromosome est constitué d'un ensemble d'éléments appelés gènes contenant les caractères héréditaires de l'individu. Il utilise un mécanisme de sélection naturelle, basée essentiellement sur la reproduction et sur le codage génétique qui stocke les informations décrivant l'individu sous forme de gènes imitant les systèmes naturels de l'évolution des espèces, [12].

## 2.5- Fonctionnement des AGs

Un algorithme génétique fonctionne typiquement à travers un cycle simple de quatre étapes :

- 1- Création d'une population de chromosomes;
- 2- Evaluation de chaque chromosome;
- 3- Sélection des meilleurs chromosomes ;
- 4- Manipulation génétique, pour créer une nouvelle population de chromosome.

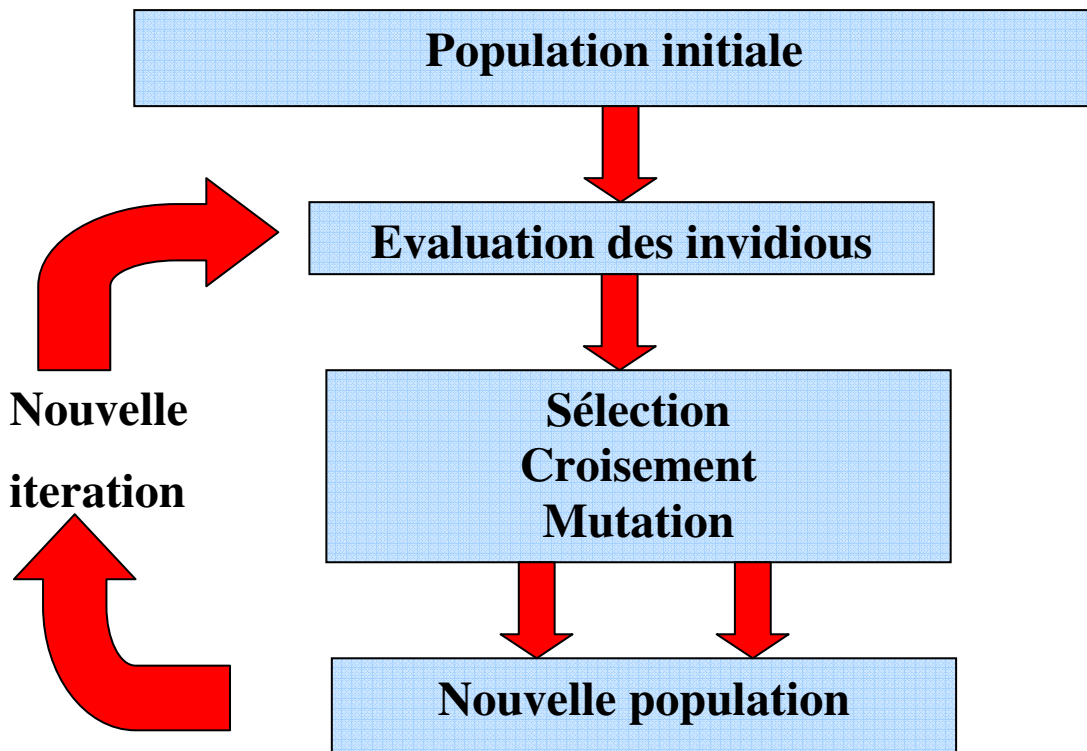


Fig. 2.1 Cycle génétique

Le cycle décrit par la (figure.2.1) est inspiré par la terminologie génétique. Lors de chaque cycle, une nouvelle génération de solution des problèmes est obtenue. Initialement, une population initiale est générée où chaque individu solution de la population est codée sous forme d'une chaîne de caractères (chromosome). Ensuite, une évaluation de chaque chromosome sera établie. Cette évaluation consiste à évaluer la qualité des chromosomes à l'aide de la fonction d'évaluation (ou fitness). Ce qui permet de sélectionner les chromosomes les plus adaptés et par conséquent leur appliquer les opérateurs génétiques (croisement et mutation) ce qui crée une nouvelle génération. A la fin du cycle une nouvelle population est acquise ouvrant ainsi la voie pour une nouvelle génération et pour conséquent un nouveau cycle, [12].

## 2.6- Les différents opérateurs de l'AGs

### 2.6.1- Le codage

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

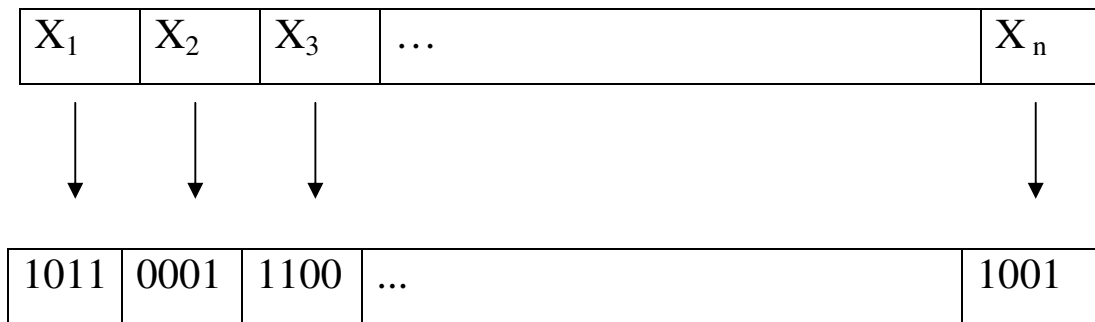
De nouvelles versions d'algorithme génétique sont apparues. Elles ne se basent plus sur le codage binaire mais elles travaillent directement sur les paramètres réels. Ces versions, appelées l'algorithme génétique réel, offrent d'une part l'avantage d'accélérer la recherche et d'autre

part de rendre plus facile le couplage avec d'autres méthodes optimisation. Ce codage est de plus en plus répandu.

A chaque itération, appelée génération, est générée une nouvelle population avec, toujours, le même nombre d'individus au total ( $n=N$ ). Cette population est mieux adaptée à l'environnement tel qu'il est représenté par la fonction objective et les critères de l'optimisation (maximisation, minimisation,...) plus on progresse dans les générations plus les individus vont devoir tendre vers l'optimum de la fonction objective.

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

Ces différentes étapes vont permettre, à la fin de la procédure, de trouver la combinaison optimale de gènes qui constitue l'individu le mieux adapté, [13].



**Fig. 2.2** Représentation d'un individu; codage réel (a) Codage binaire (b)

### 2.6.2- Génération de la population initiale

La rapidité de l'algorithme est fortement dépendante du choix de la population initiale d'individus. Si la position de l'optimum dans l'espace d'état est totalement inconnue, il est naturel et plus simple de générer aléatoirement des individus en faisant des tirages uniformes dans l'espace d'état en veillant à ce que les individus produits respectent les contraintes. Si par contre un sous domaine particulier afin d'accélérer la convergence, [13].

#### 2.6.2.1- Taille d'une population

La taille de la population est l'un des paramètres les plus importants d'un algorithme génétique. Trop grande, la population ralentit le processus d'optimisation, trop petite, la population n'emploie pas pertinemment les opérateurs génétiques. Elle affecte sérieusement les propriétés de convergence d'un algorithme stochastique. De plus, il a été démontré que la taille de la population et le codage des variables en chromosomes affectent de manière significative

l'efficacité des algorithmes génétiques. D'une façon générale, on utilise une taille de la population de 5 à 10 fois le nombre de variables à optimiser, [14].

### 2.6.3- Evaluation (fitness)

L'évaluation consiste à calculer la force de chaque chromosome de la population afin que les plus forts soient retenus (étape de sélection). Un algorithme génétique tend donc à maximiser la force des individus de la population, aucune condition particulière n'est requise pour la fonction objective, il suffit simplement que cette fonction retourne des valeurs numériques comparables. Auxquelles dépend la performance de l'algorithme génétique, clairement, le choix de la fonction d'évaluation va fortement sur le succès de l'algorithme génétique, [14].

### 2.6.4- Sélection

Cet opérateur détermine la capacité de chaque individu à persister dans la population et à se diffuser. En règle générale, la probabilité de survie d'un individu sera directement liée à sa performance relative au sein de la population. Cela traduit bien l'idée de la sélection naturelle : les gènes les plus performants ont tendance à se diffuser dans la population tandis que ceux qui ont une performance relative plus faible ont tendance à disparaître. Donc, après avoir réalisé l'évaluation d'une génération, la population à un instant, on opère une sélection à partir de la fonction d'adaptation. La sélection permet d'identifier statistiquement les meilleurs individus d'une population et d'éliminer les mauvais. Il existe plusieurs méthodes de sélection, parmi lesquelles on trouve, [14].

#### 2.6.4.1- Sélection par roulette biaisée (sélection sur la fitness)

La méthode RWS (Roulette Wheel Sélection) consiste à associer à chaque individu de la population un segment dans la roulette. La largeur de ce segment est proportionnellement à sa fitness ou, plus précisément, à une probabilité d'être sélectionnée proportionnellement à sa fitness.

Donc à chaque individu  $X$  est associé une probabilité  $P_s(X)$  tel que La méthode RWS (Roulette Wheel Sélection) consiste à associer à chaque individu de la population un segment dans la roulette. La largeur de ce segment est proportionnellement à sa fitness ou, plus précisément, à une probabilité d'être sélectionnée proportionnellement à sa fitness, [14].

Donc à chaque individu  $X$  est associé une probabilité  $P_s(X)$  tel que

$$P_s(X) = \frac{F(X_i)}{\sum F(X_k)} \quad (2,1)$$

---

(Ou :  $X \in P$ ). La sélection d'un individu revient à choisir aléatoirement un point segment avec une distribution de probabilité uniforme. Avec ce système, les grands segments, c'est à dire les bons individus seront plus souvent adressé que les petits. Une certaine diversité est cependant maintenue, car même les individus les moins performants conservent une chance d'être choisis, [15].

#### **2.6.4.2- Sélection par tournoi**

La sélection par tournoi consiste à choisir aléatoirement un certain nombre d'individus, et à sélectionner pour la reproduction celui qui a la plus grande adaptation. Cette étape est autant de fois qu'il y a d'individus à remplacer dans la génération. Les individus qui participent à un tournoi restent dans la population et sont de nouveau disponibles pour les tournois ultérieurs, [13].

#### **2.6.4.3- Sélection par élitisme**

Du fait que le caractère aléatoire de la sélection ne garantit pas que le meilleur individu soit conservé, la méthode de sélection par élitisme surpasse cet inconvénient en recopiant automatiquement le meilleur individu de chaque génération directement dans la génération suivante. Le modèle élitiste, en fait, n'est pas une méthode de sélection en soi, mais plutôt une variante qu'on ajoute à d'autres méthodes, [13].

#### **2.6.4.4- Sélection par troncature**

Dans cette méthode, la sélection n'est pas laissée au hasard. Les individus sont triés selon leur fonction d'adaptation, ensuite sont choisis les premiers individus de la génération pour générer la suivante. Cela revient en quelque sorte à généraliser le modèle élitiste à tout le processus de sélection. Le problème avec cette méthode est qu'on ne peut pas maintenir une diversité génétique suffisante dans la population, [13].

#### **2.6.5- Le croisement**

Le croisement en anglais cross over consiste à produire des individus à partir de la population initiale. Il a commencé juste après l'étape de sélection, les individus survivants sont répartis en couple aléatoirement. Chaque couple est ensuite passé à l'opérateur de croisement.

L'opérateur de croisement prend en entrée deux individus "parents ( $X_1, X_2$ )" et donne, en sortie, deux individus "enfants ( $E_1, E_2$ )" qui reprennent des caractéristiques de leurs deux "parents". Son action exacte est déterminée par des paramètres aléatoires. Ce croisement permet le "brassage génétique", afin d'essayer de concentrer dans le même individu les plus intéressantes, [12].

Nous avons trois types de croisement standard :

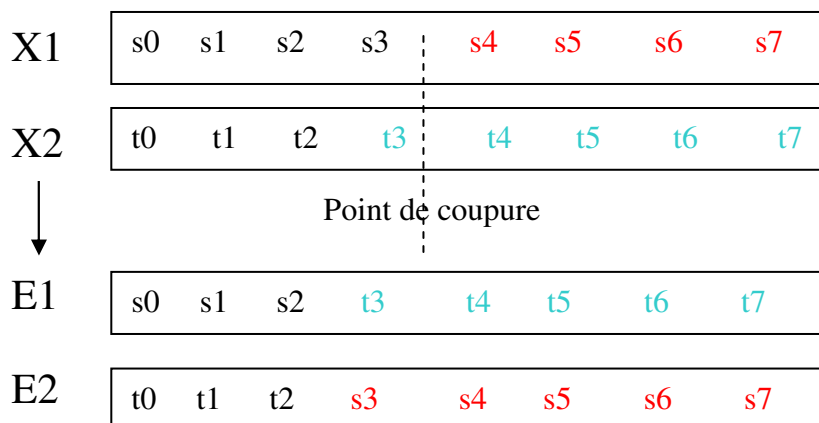
- Le croisement à un point;
- Le croisement multipoints;
- Le croisement uniforme.

### 2.6.5.1- Croisement à un point

Le croisement à un point est le croisement le plus simple. Pour effectuer ce type de croisement, on sélectionne aléatoirement n point de coupure  $k$  qui soit compris entre 1 et  $L-1$  ( $L$  est la longueur du chromosome) puis on subdivise le génotype de chacun des parents en deux parties de part et d'autre part de ce point. On échange ensuite les deux sous chaînes terminales de chacun des deux chromosomes, ce qu produit deux enfants, [13].

$$E1(i) = \begin{cases} X1(i) & \text{si } i \text{ appartient à } [1, k] \\ X2(i) & \text{si } i \text{ appartient à } [k+1, L] \end{cases} \quad (2,2)$$

$$E2(i) = \begin{cases} X2(i) & \text{si } i \text{ appartient à } [1, k] \\ X1(i) & \text{si } i \text{ appartient à } [k+1, L] \end{cases} \quad (2,3)$$



**Fig. 2.3** Opérateur de croisement à un seul de coupure

### 2.6.5.2- Croisement multipoints

Ce type de croisement peut être vu comme une généralisation du croisement à un point, en découpant le chromosome non pas en 2 sous- chaînes mais  $k$  sous- chaînes.

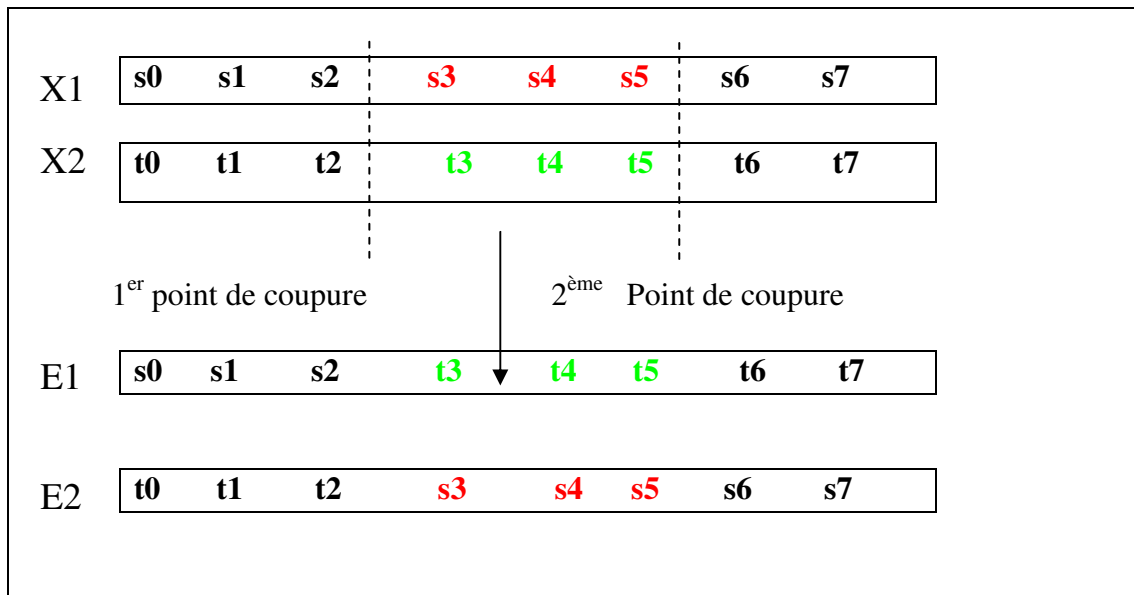


Fig. 2.4 Opérateur de croisement à deux points de coupure

### 2.6.5.3- Croisement uniforme

Le croisement uniforme peut être vu comme croisement multipoints le nombre de coupures est indéterminé a priori. Pratiquement on utilise un "masque de croisement", engendré aléatoirement pour chaque couple d'individus, qui est un mot binaire de même longueur que les chromosomes. Un "0" à la n ième positions du masque laisse inchangé les symboles à la n ième positions des deux génotypes, un "1" déclenche un échange des symboles correspondants, [13].

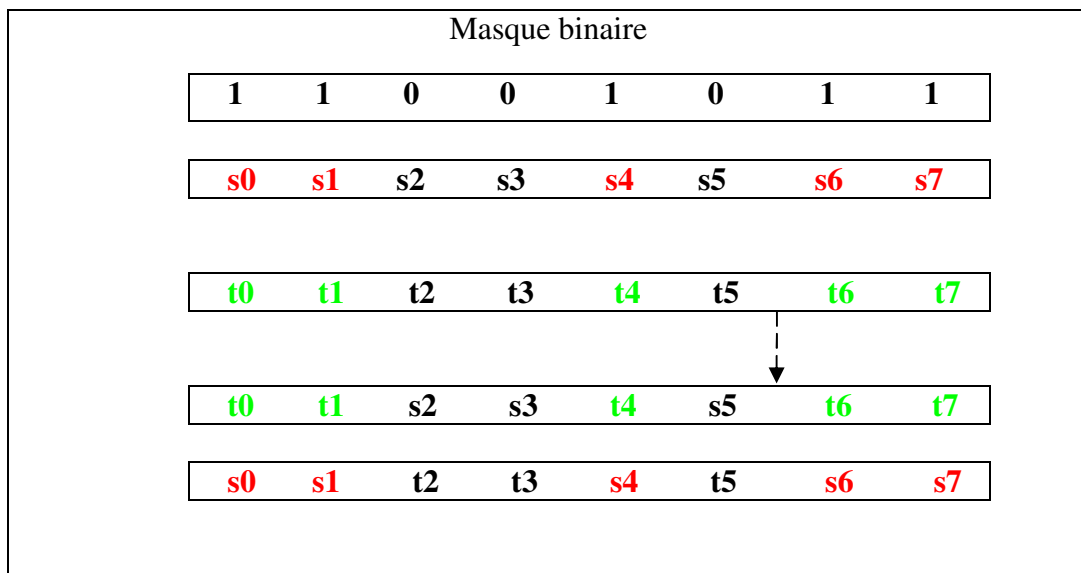
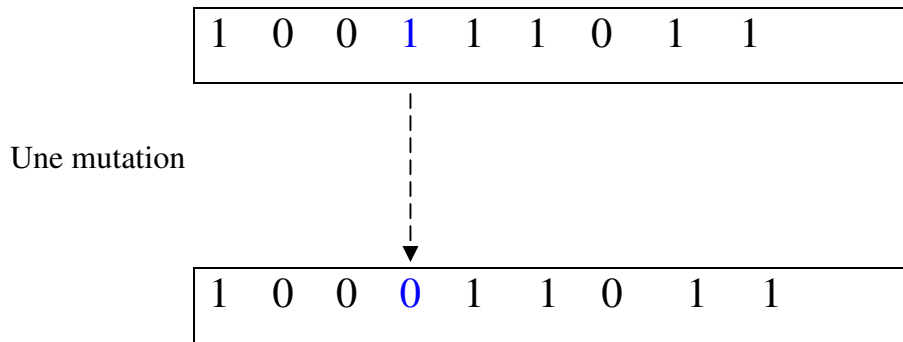


Fig. 2.5 Opérateur de croisement uniforme

### 2.6.6- La mutation

La mutation veut dire changement ou modification. En biologie, elle signifie la modification des bases de l'ADN.

Dans les algorithmes génétiques elle consiste à échanger la valeur d'un bit sélectionné au hasard. Elle assure la diversité de la population par l'exploration de nouveaux points de l'espace, [14].

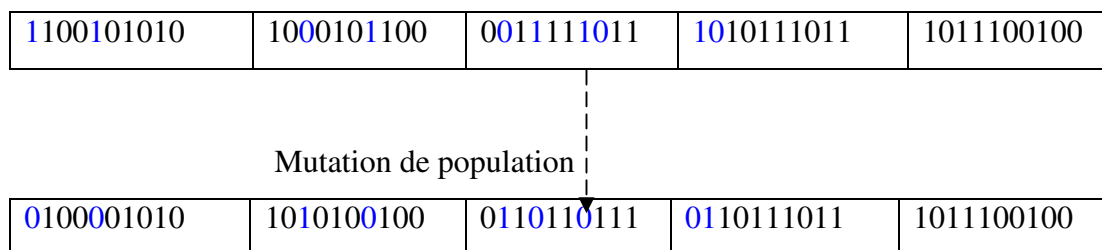


**Fig. 2.6** Représentation schématique d'une mutation dans un chromosome

### 2.6.6.1- Probabilités de mutation

La probabilité de mutation  $P_m$  désigne le nombre de bits à muter  $k$ . Une fois ce nombre défini,  $k$  bits de la population seront choisis au hasard pour être mutés.

Prenons l'exemple d'une population constituée de cinq chromosomes, ou chaque chromosome est représenté par une chaîne de dix bits. Le nombre de bits total de la population sera 50 bits. Pour une probabilité de mutation de 0.2 seul dix bits subiront une mutation. Leur emplacement sera choisi aléatoirement, [13, 14].



**Fig. 2.7** Notion de probabilité de mutation

Contrairement au croisement, la mutation converge lentement vers les meilleures solutions, de ce fait la probabilité de mutation doit être petite et inférieure à la probabilité de croisement.

Cette faible probabilité nous permet d'éviter une convergence prématurée tout en nous permettant d'explorer de nouveaux points.

### 2.6.7- Critère d'arrêt

Le plus souvent on utilise comme critère d'arrêt un nombre prédéfini de génération. Plus la fonction à optimiser est complexe plus le nombre de génération est élevé, [15].

## 2.7- Application d'optimisation par AGS

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

### 2.7.1- Procédure de maximisation par algorithme génétique

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 :

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

La valeur décimale,  $x'$ , correspondant au code binaire de chaque chromosome binaire :

$V_1 = (a_{k-1} \dots a_1 a_0)$  est calculé par :

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

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

$$X_j = a + X_j \frac{(b - a)}{(2^k - 1)} \quad (2,6)$$

- Pour chaque génération les calculs suivants sont effectués :
  - Calcul de fonction d'évaluation  $feval(X_i)$  pour chaque chromosome  $V_i$ ,
  - Calcul de l'évaluation totale,  $F$ , de la population constitué de  $N$  individus :

$$F = \sum_{j=1}^N feval(X_j) \quad (2,7)$$

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

$$Pa_j = feval(X_j) / F \quad (2,8)$$

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

$$q_j = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_j \quad (2,9)$$

- Pour sélectionner à l'aide de la roue de la loterie biaisée, on fait tourner la roulette  $N$  fois (taille de la population) de la façon suivante :
- A chaque fois, on génère aléatoirement un nombre  $r$  dans l'intervalle  $[0, 1]$ . Ensuite, on compare ces nombres aux probabilités  $q_i$ . Si  $r_j < q_j$ ,  $v_j$  est sélectionné, sinon  $v_j$  est sélectionné avec  $2 < j < N$  tel que  $q_{j-1} < r_j < q_j$ . On procède de la même manière pour le reste des  $r_j$  ( $j=1, N$ ).
- 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  $r_j < P_c$  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  $r_j$  probabilité de mutation  $P_m$ .
- Dans notre cas, après chaque génération, le nombre est incrémenté progressivement afin d'introduire une assez grande diversification dans la population.

### 2.7.2- Exemple d'application

On va utiliser les algorithmes génétiques pour optimiser la fonction suivante :

$$f(x) = \sin(x) + \exp(0.1 * x) \quad (2,10)$$

Sur l'intervalle  $[-1, 3]$  avec une précision  $1/10$ , l'allure de cette fonction est donnée par la Fig. 2.8

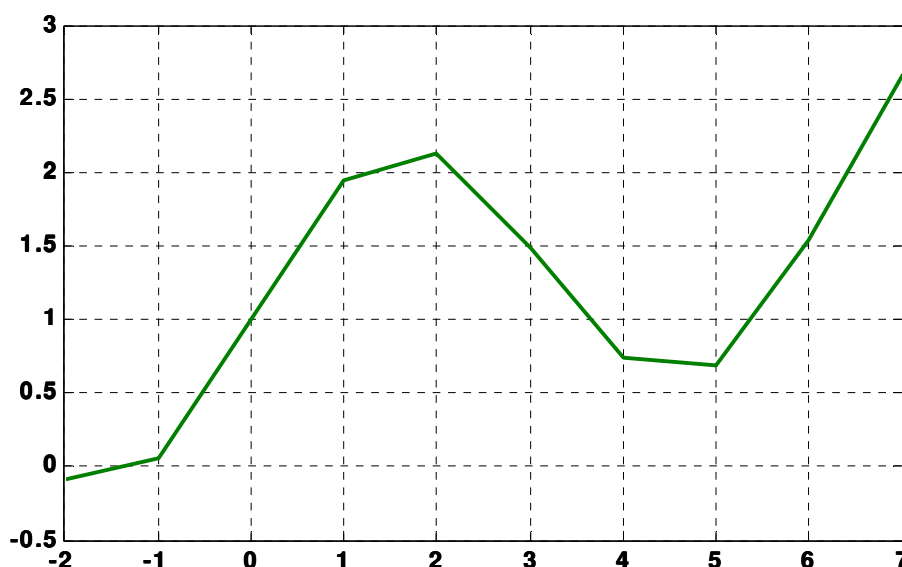


Fig .2.8 Allure de la fonction à optimiser.

- **Maximisation d'une fonction à une variable**

Le maximum obtenu est  $f(x) = 2.1632$  pour une valeur de  $x = 1.858$

- **Première phase : la genèse de la population et les paramètres**

Pour ce problème de maximum d'une fonction, nous allons prendre les paramètres suivants :

- La longueur de l'intervalle est  $3-1=2$  ;
- Chaque unité doit être subdivisée en  $10^n$  (précision souhaitée,  $n=1$ ) ;
- Donc, l'intervalle est subdivisée en  $2^k * 10 = 20$  petits intervalles; en  $2*10 = 20$  petits intervalles
- Le nombre de bits requis pour représenter tous les réels considérés dans l'intervalle est  $k$  tel que :  $2^k \geq 20 \Rightarrow k=5$
- la probabilité de croisement  $P_c = 0.75$
- la probabilité de mutation  $P_m = 0.01$ .
- Pour modéliser le problème, convenons de ce qui suit :

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

**V<sub>1</sub> = 10101**

**V<sub>2</sub> = 00110**

**V<sub>3</sub> = 10011**

**V<sub>4</sub> = 10111**

- **Deuxième phase : l'évaluation**

On va commencer par calculer les valeur de ou le chromosome  $V$  représente le réel  $x$  pour tout les chromosomes  $V_i$  pour  $i = 1,2,3,4$ .

Ils correspondent aux valeurs :

**X<sub>1</sub> = 21, x<sub>1</sub> =  $1 + 21 * (2) / 31 = 2.3548$**

**X<sub>2</sub> = 6, x<sub>2</sub> =  $1 + 6 * (2) / 31 = 1.3871$**

**X<sub>3</sub> = 19, x<sub>3</sub> =  $1 + 19 * (2) / 31 = 2.2258$**

**X<sub>4</sub> = 23, x<sub>4</sub> =  $1 + 23 * (2) / 31 = 2.4839$**

Par conséquent, leurs fonctions d'évaluation respectives sont :

**Eval (V<sub>1</sub>) = f(x<sub>1</sub>) = 1.9736**

**Eval (V<sub>2</sub>) = f(x<sub>2</sub>) = 2.1320**

**Eval (V<sub>3</sub>) = f(x<sub>3</sub>) = 2.0423**

**Eval (V<sub>4</sub>) = f(x<sub>4</sub>) = 1.8933**

La plus grande évaluation **2.1320** et la valeur moyenne **2.0103**

Formons la première génération.

- **Troisième phase : la sélection**

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

Commençons par le calcul de l'aptitude totale des chromosomes :

$$F = f(x_i) = 8.0412 \sum_{i=1}^4$$

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

$$P_1 = f(x_1) / F = 0.2454 \quad Q_1 = 0.2454$$

$$P_2 = f(x_2) / F = 0.2651 \quad Q_2 = 0.5106$$

$$P_3 = f(x_3) / F = 0.2540 \quad Q_3 = 0.7646$$

$$P_4 = f(x_4) / F = 0.2354 \quad Q_4 = 1.0000$$

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

**0.512 0.71 0.216 0.773**

**$r = 0.512$   $Q_3 > 0.512$   $V_3$  est sélectionné**

**$r = 0.710$   $Q_3 > 0.71$   $V_3$  est sélectionné**

**$r = 0.216$   $Q_1 > 0.216$   $V_1$  est sélectionné**

**$r = 0.773$   $Q_4 > 0.773$   $V_4$  est sélectionné**

La première génération devient

**$V_1' = V_3 = 10011$**

**$V_2' = V_3 = 10011$**

**$V_3' = V_1 = 10101$**

**$V_4' = V_4 = 10111$**

- **Quatrième phase : le croisement**

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

On obtient :

**0.9501 0.2311 0.6068 0.4860**

Alors  $V_2, V_3, V_4$  sont sélectionnés. Comme le nombre est impair, on laisse tomber le dernier.

Cela donne pour le croisement :

**$V_2' 10011 10101$**

**$V_3' 10101 10011$**

La nouvelle population est donc :

**V1'' 10011**

**V2'' 10101**

**V3'' 10011**

**V4'' 00111**

- **Cinquième phase : la mutation**

L'opérateur de mutation est effectué bit par bit. La probabilité de la mutation est  $P_m = 0.01$   $\times 5 = 20$  bits dans toute la population. Chaque bit a la même chance de mutation, il y a 4. On tourne la roulette 20 fois pour générer  $r$  dans  $[0, 1]$ , Si  $r < 0.01$ , on mute le bit de ce rang. Seulement, au 16<sup>ième</sup> tour, on obtient  $r=0.008$ , on mute, alors le 16<sup>ième</sup> bit qui correspond au 1<sup>ième</sup> bit du 5<sup>ième</sup> vecteur.

Finalement, la première génération devient :

**V1 10011, x1 = 19**

**V2 10101, x2 = 21**

**V3 10011, x3 = 19**

**V4 00111, x4 = 7**

En évaluant la première génération, on obtient :

**X1=2.2258 Eval (V1) = 2.0423**

**X2=2.3548 Eval (V2) = 1.9736**

**X3=2.2258 Eval (V3) = 2.0423**

**X4= 1.4516 Eval (V4) = 2.1491**

Evaluation totale égale 8.2074 la plus grande valeur 2.1491 la valeur moyenne égale 2.0518

On vient de terminer une itération de la boucle "tant que", et la solution délivrée par cette génération est  $X_3=2.2258$  qui correspondre à  $f(x_3)= 2.0423$

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

## 2.8- Conclusion

Ce chapitre, est une exposition aux principes des algorithmes génétiques. Dont sont des systèmes originaux, s'inspirant du fonctionnement présumé du vivant. La méthode utilisée est très différente des algorithmes classiques d'optimisation. On retient quatre points principaux :

1. Utilisation d'un codage des paramètres, et non des paramètres eux-mêmes ;

2. Travail sur une population de points, au lieu d'un point unique ;
3. Utilisation des seules valeurs de la fonction à optimiser, et non de leur dérivée ou d'une autre connaissance auxiliaire ;
4. Utilisation de fonctions de transition probabilistes, non déterministes.

**CHAPITRE 3**  
**OPTIMISATION DE LA CONCEPTION**  
**D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR L'AG**

### 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 connu 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 annuelle 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 son 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 la possibilité de l'augmenter.

### 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 amortis par les économies d'énergie réalisées lorsqu'ils fonctionnent pendant de longues périodes et à des charges se rapprochant de la pleine charge.

Le Tab. 3.1 donne des valeurs typiques du rendement  $\eta$  et du facteur de puissance ( $F_p$ ) pour des moteurs de diverses puissances de construction classique ainsi que pour des moteurs à haut rendement.

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

charge		100%		75%		50%	
hp	Type	$\eta$	F <sub>p</sub>	$\eta$	F <sub>p</sub>	$\eta$	F <sub>p</sub>
0.75	HR	84.0	80.5	84.0	74.0	81.5	62.0
0.75	CL	72.0	78.0	72.0	70.0	68.0	58.0
7.5	HR	90.2	88.0	90.2	85.0	90.2	77.0
7.5	CL	84.0	85.5	84.0	80.5	81.5	75.0
37	HR	92.8	84.5	93.0	81.0	91.7	73.0
37	CL	91.7	84.0	91.7	81.0	90.2	71.5
75	HR	93.5	91.5	94.0	91.0	93.8	87.0
75	CL	91.7	83.5	91.7	80.5	90.2	73.0
150	HR	94.8	90.5	94.6	88.5	94.3	83.0
150	CL	89.0	88.5	91.7	86.5	89.5	80.0

**Tab. 3.1** Comparaison entre les moteurs à haut rendement et les moteurs classiques

### 3.3- Caractéristiques des moteurs à haut rendement

Les moteurs à haut rendement ont la même construction que les moteurs classiques mais il se distinguent 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, [4].

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

La réduction des pertes permet une élévation moindre de la température dans le moteur, aussi 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.

### 3.4 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 :

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

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 à mesurer 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

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

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

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, [17].

### 3.5- 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 à un rapport avec le réseau, alors que la seconde est en rapport avec le concepteur du moteur lui-même. Pour l'évaluation du rendement, diverses méthodes sont proposées.

- Méthode de la plaque signalétique.
- Méthode directe.
- Méthode Statistique.
- Méthode du circuit équivalente.
- Méthode des pertes séparées, [18].

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 :  $P_{sup}$

### 3.6- 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 éprouves 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, [17,18] :

### **3.6.1- 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'écureuil avec la puissance dans la gamme 1 ÷ 190 kW. La méthode ( IEEE 112-B ) exige trois essais, en particulier.

- Essai thermique à une charge donnée ;
- Essai à vide ;
- Essai à la charge variable sous conditions données.

### **3.6.2- 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 :

- Méthode directe ;
- Méthode indirecte.

### **3.6.3- 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, [19].

### **3.7- 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, [18, 19].

#### **3.7.1- Méthode 1**

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

#### **3.7.2- Méthode 2**

La puissance d'entrée et le rendement sont mesurés 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.

#### **3.7.3- 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 mesurer la puissance d'une seule machine, dont la différence de deux puissances donne la somme des pertes

#### **3.7.4- 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

#### **3.7.5- 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 à la basse fréquence, [20].

### 3.8- Techniques d'amélioration 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.

### 3.9- Amélioration du rendement d'une MAS par l'application des AGs

Dans ce travail, on appliqué les AGs à l'optimisation de la conception d'une machine asynchrone. La méthode d'optimisation proposée est basée sur un processus de calcul, dont les paramètres de la machine sont : Diamètre d'alésage, épaisseur de l'entrefer, épaisseur de la culasse statorique, rapport géométrique du stator, hauteur de la dent statorique et le poids de la machine. L'effet de trios matériaux sur le rendement de la machine sera également étudié par la suite. L'ensemble des étapes est résumé dans l'organigramme de la Fig. 3.1, qui inclut deux phases essentielles, phase de calcul préliminaire et phase d'optimisation par les AGs selon la fonction objective qui est la somme des pertes.

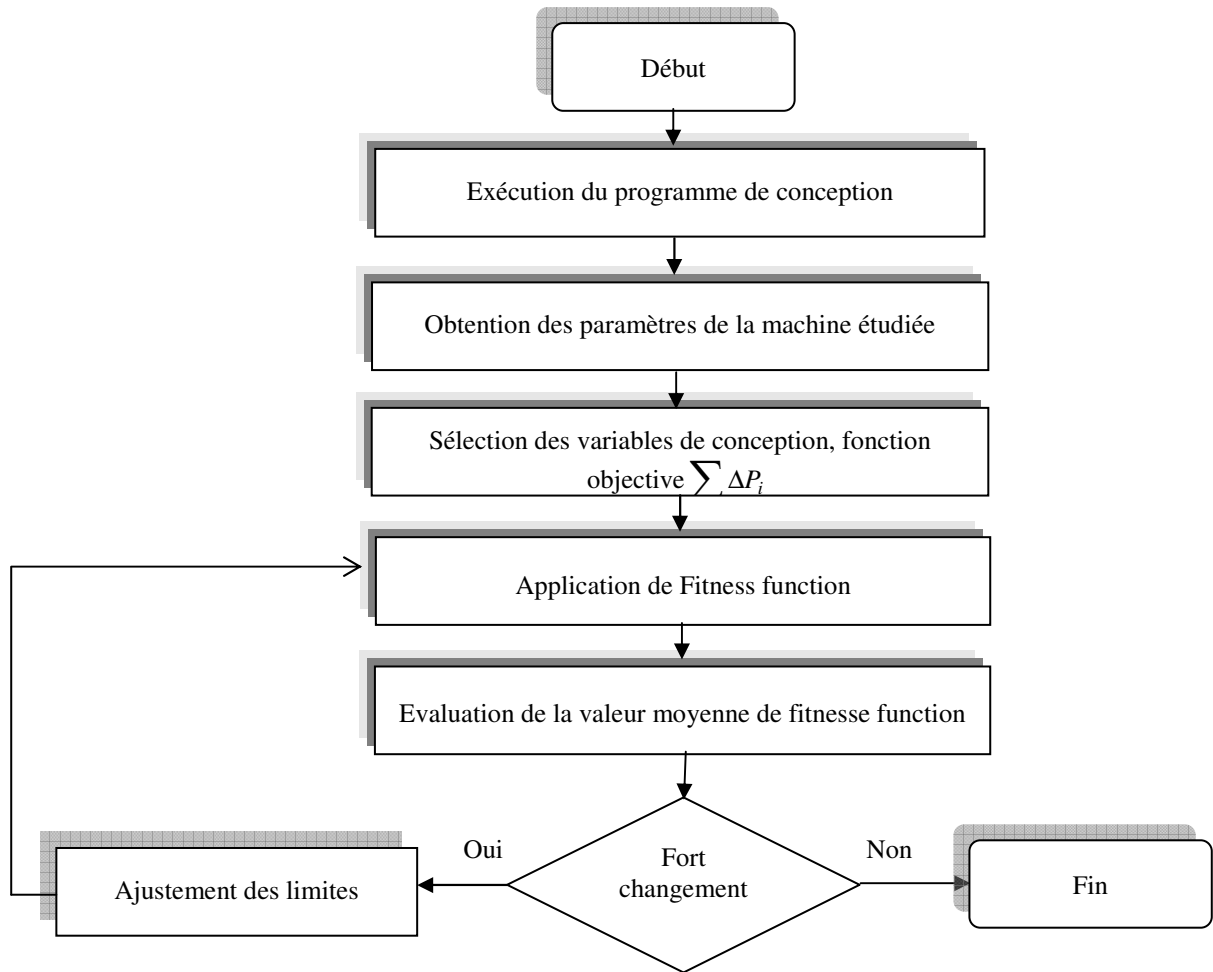


Fig. 3.1 Organigramme de la méthode d'optimisation proposée

### 3.9.1- Méthode de conception

La méthode de conception d'une machine asynchrone est résumée dans les étapes suivantes :

#### 3.9.1.1- Calcul préliminaire

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.

Le dimensionnement d'une machine électrique dépend, tant du point de vue magnétique que du point de vue électrique, d'une série de facteurs liés en partie aux propriétés thermiques des matériaux isolants et, en partie, à la durée de vie du collecteur, ainsi qu'aux exigences de l'exploitation, pour ce qui concerne notamment la capacité de surcharge, le rendement, le facteur de puissance et les conditions de démarrage.

Les facteurs qui influent sur le dimensionnement ne sont pas les mêmes pour tous les types de machines. Dans celles à collecteur, outre l'échauffement et le rendement, la commutation sont également déterminants. En revanche, dans les machines sans collecteur, ce sont la capacité de surcharge, le facteur de puissance et les conditions de démarrage qui deviennent déterminantes.

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 :

$$\frac{P_s 10^{-3}}{l_i D^2 60n} = \frac{K_{w1} A_1 \widehat{B}_\delta}{8,6 \cdot 10^3} = C \quad (3,4)$$

C : est appelé le coefficient d'utilisation.

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

$$P_s = \frac{P_u}{\eta \cos \varphi} \quad (3,5)$$

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

Le rendement  $\eta$  et le facteur de puissance  $\cos \varphi$  sont tirés d'après des diagrammes tracés à partir des études statistiques faites sur un grand nombre de moteurs, [21].

Ou par l'expression suivante :

$$\eta = \frac{P_u}{\sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi} \quad (3,6)$$

En posant :

$$A_1 = \frac{m_1 \cdot 2 \cdot N_1 I_1}{\pi \cdot D} \quad (3,7)$$

Où  $A_1$  désigne la densité linéaire de courant, c'est-à-dire le nombre d'ampères-tours par  $m$  de périphérique de l'induit. Alors que l'induction dans l'entrefer  $B_\delta$  caractérise l'utilisation magnétique de la machine, la densité linéaire  $A_1$  en caractérise l'utilisation électrique.

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

$$\lambda = \frac{l_i}{\tau_p} = \sqrt[3]{p} \quad (3,8)$$

### 3.9.1.2- Dimensions principaux de la machine

Choisir le nombre d'encoche statorique  $Z_1$  revient à choisir le nombre d'encoche par pôle et par phase, sachant que le nombre de paire de pôle et nombre de phases sont donnés.

Pour le choix de nombre d'encoches rotoriques  $Z_2$ , 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 statoriques  $Z_1$ . Ces tableaux sont établis pour atténuer les vibrations et assurer une bonne caractéristique mécanique de la machine.

### 3.9.1.3- Choix de l'entrefer

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

Pour limiter le courant absorbé par la machine pendant le fonctionnement à vide on choisit très étroit. On détermine l'épaisseur de l'entrefer en utilisant la courbe qui donne la variation de l'épaisseur en fonction du diamètre et le nombre de paire de pôles, [21].

### 3.9.1.4- Calcul de la FMM

Le calcul du circuit magnétique constitue une partie importante la construction des machines électriques. La loi de circulation du champ dans le circuit magnétique constitue la base fondamentale pour ce calcul, soit :

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum F(At) \quad (3,9)$$

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

$$F = N.I \quad (3,10)$$

Pour simplifier les calculs dans les machines électriques on décompose l'intégrale (3,9) en une somme de produits :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{i=1}^n H_i \cdot l_i = F(At) \quad (3,11)$$

$$H_i \cdot l_i = F_i \quad \text{en (A)} \quad (3,12)$$

On aura :

$$\sum_{i=1}^n H_i \cdot l_i = F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n = F = N.I \quad (3,13)$$

$H$  Est exprimé en A / m ;

$l_i$  En mètre (m) ;

$F$  En Ampère tours (At).

Le calcul de la FMMt s'effectue de la manière suivante :

$$2F_{\delta} = 2 \cdot K_c \cdot \delta \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \quad (3,14)$$

$$2F_{z1} = 2 \cdot H_{z1} \cdot h_{z1} \quad (3,15)$$

$$2F_{z2} = 2 \cdot H_{z2} \cdot h_{z2} \quad (3,16)$$

$$F_{j1} = H_{j1} \cdot l_{j1} \quad (3,17)$$

$$F_{j2} = H_{j2} \cdot l_{j2} \quad (3,18)$$

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

$$F_{tot} = 2F_{\delta} + 2F_{z1} + 2F_{z2} + F_{j1} + F_{j2} \quad (3,19)$$

On remarque que les dents rotoriques et statoriques sont parcourues deux fois.

### 3.9.1.5- Coefficient de saturation

Supposons que l'on a tracé la courbe d'induction en fonction de la FMM ( $B = f(F)$ ) pour différentes valeurs de  $B_{\delta}$ .

$F$  F.M.M nécessaire pour l'excitation de la machine.

On remarque que pour des petites valeurs de  $B_{\delta}$  la chute de tension magnétomotrice dans l'entrefer est prédominante, mais dès que  $B_{\delta}$  dépasse une certaine valeur, la chute de tension dans les dents augmente ; le rapport de la somme des chutes de tensions FMMt dans l'entrefer et les dents à la tension  $F_{\delta}$  augmente.

$$K_s = \frac{F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} > 1 \quad (3,20)$$

### 3.9.1.6- Les pertes

Les pertes d'une machine électrique peuvent être divisées en trois parties :

- Les pertes par effet Joule ou les pertes dans le cuivre ;
- Les pertes dans fer (Hystérésis, courant de Foucault et pulsation du flux) ;
- Les pertes par frottement et ventilation, qui sont très petites par rapport aux autres pertes.

#### 3.9.1.6.1- Pertes dans le cuivre ou pertes joule de la machine

- **Dans le stator**

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

$$P_j = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (3,21)$$

$R_1$  Résistance statorique par phase.

$I_1$  Courant de phase.

$m_1$  Nombre de phases.

- **Dans le rotor**

Les pertes dans le cuivre pour le secondaire sont

$$P_{Cui} = m_2 R_2 \cdot I_{2BAR}^2 = m_2 \cdot R_2' \cdot I_2'^2 \quad (3,22)$$

$R_2$  Représente la résistance totale d'une phase secondaire (résistance d'une barre et résistance d'anneau rapportée au courant de la barre).

$R_2'$  La résistance totale d'une phase du secondaire ramenée au primaire.

$I_2'$  Le courant de barre ramenée au primaire.

- ❖ Résistance d'une barre

$$R_{bar} = \frac{\rho L_{bar}}{S_{bar}} \quad (3,23)$$

$L_{bar}$  La longueur d'une barre avec une induction égale au pas dentaire statorique, et un dépassement de chaque côté.

$$L_{bar} = \frac{\tau_{z1}}{\sin \alpha} + h \quad (3,24)$$

$h$  Le dépassement.

$$\tan g \alpha = \frac{\tau_{z1}}{L_a} \cdot \alpha = \text{arctg} \frac{\tau_{z1}}{L_a} \quad (3,25)$$

- ❖ Résistance de l'anneau

$$R_{an} = \rho \frac{L_{an}}{S_{an}}$$

- ❖ La longueur de l'anneau :

$$L_{an} = \tau_p - \frac{d_b}{2} \quad (3,26)$$

$d_b$  Diamètre de la barre.

### 3.9.1.6.2- Pertes dans le fer

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

- **Pertes par Hystérésis**

Les pertes par Hystérésis représentent l'énergie nécessaire à l'aimantation cyclique alternative du fer.

Les pertes par Hystérésis sont proportionnelles à

- ✓ L'aire du cycle d'hystérésis.
- ✓ Aux nombres de cycles d'aimantation.

L'équation de **RICHTER** nous permet de calcul

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_m^2 \quad (3,27)$$

Avec:

$K_h$  coefficient de pertes par hystérésis.

- **Pertes par courants de Foucault**

L'aimantation cyclique alternative engendre des courants induits dans le fer, ces courants sont appelés courants de Foucault, pour réduire les pertes engendrées par ces courants, utilise des tôles feuilletées isolées les unes des autres, disposées parallèlement aux lignes d'induction. Les pertes par courants de Foucault peuvent être calculées par l'équation.

$$P_w = \sigma_w (S_t f \cdot \hat{B})^2 \cdot 10^2 \quad (\text{W/Kg}) \quad (3,28)$$

$S_t$  Désigne l'épaisseur de tôles du fer ;

$\sigma_w$  Constant de fer;

$f$  Fréquence de courant.

Les pertes par Hystérésis et par courants de Foucault sont transformées en chaleur, la somme des pertes par seconde dans un kg de fer est :

$$P_{h+w} = \sigma_H f \cdot B^2 \cdot 10^{-2} + \sigma_w (S_t f \cdot \hat{B})^2 \cdot 10^2 \quad (\text{W/Kg}) \quad (3,29)$$

Les constants  $\sigma_H$  ,  $\sigma_w$  pour les différents matériaux sont donnés, [21].

- **Pertes superficielles par pulsation du flux dans les dents**

Les pertes superficielles par pulsation du flux dans les dents sont faibles dans les petites machines à faible puissance, elles dépendent de l'ouverture d'encoche des deux parties de la machine et sont estimées à 0.5% de  $P_U$ .

- ✓ **Les pertes Hystérésis dans la culasse statorique**

Les formules générales, pour le calcul des pertes par Hystérésis, ne tiennent pas compte de l'influence de la répartition du champ dans la culasse. Pour tenir compte de ce phénomène, on multiplie la formule des pertes par Hystérésis et par un coefficient  $K_{hj}$ .

$$P_{hj} = \sigma_H f \cdot \widehat{B}^2 m_j \cdot K_{hj} \cdot 10^{-2} \quad (3,30)$$

Le coefficient  $K_{hj}$  est représenté par un diagramme en fonction du paramètre  $\frac{D}{D_e}$  pour différentes paires de pôles.

$D$  Diamètre à l'alésage ;

$D_e$  Diamètre extérieur de la culasse ;

$m_j$  La masse de la culasse.

- ✓ **Les pertes par courants de Foucault dans la culasse statorique**

Pour les mêmes considérations, de calcul des pertes par courants de Foucault, la formule générale est multipliée par un coefficient  $K_{wj}$  pour tenir compte de la répartition du champ dans la culasse.

$$P_{wj} = \sigma_w (S_t f \cdot \widehat{B}_j) m \cdot K_{wj} \cdot 10^2 \quad (3,31)$$

- ✓ **Pertes dans les dents**

- ❖ **Les pertes Hystérésis dans les dents**

Les pertes par Hystérésis dans la zone dentaire statorique des machines électriques sont égales à :

$$P_{hz} = \sigma_H f \cdot \widehat{B}_Z^2 m_Z \cdot 10^{-2} \quad (3,32)$$

$m_z$  Masse des dents ;

$B_Z$  Valeur moyenne des inductions au pied, au milieu et à la tête dans les dents.

- ❖ **Les pertes par courants de Foucault dans les dents**

$$P_{hz} = \sigma_H f \cdot \widehat{B}_Z^2 m_Z \cdot 10^{-2} \quad (3,33)$$

Toute fois cette équation n'est valable que pour des inductions sinusoïdales dans les dents.

### 3.9.1.7- Le rendement

L'expression du rendement est donnée par l'équation suivante :

$$\eta = \frac{P_U}{P_U + \sum \text{pertes}} \quad (3,34)$$

La méthode proposée est appliquée à une machine type DIN-IEC-F [19], dont la plaque signalétique est donnée au Tab. 3.2

Pu	Puissance utile	1.1	kW
$V_s$	Tension nominale	220	V
$p$	Nombre de paires de pôles	2	---
$m_1$	Nombre de phases de la machine	3	---
$f_s$	Fréquence	50	Hz
$\cos \varphi$	Facteur de puissance	0.81	---
$\eta$	Rendement	0.74	---
$n_r$	Vitesse	1400	tr/min

**Tab. 3.2** Plaque signalétique de la machine étudiée

Les résultants de quelques paramètres obtenus après l'exécution du programme de conception sont reportés dans le Tab. 3.3.

Abrév.	Paramètres	Valeurs	Abrév.	Paramètres	Valeurs
$D (mm)$	Diamètre d'alésage	120	$R_s (\Omega)$	Résistance - phase enroulement .stator	8.8999
$MW (kG)$	Poids de la machine	12.41 0	$I_o (A)$	Courant à vide	0.079
$M (H)$	Inductance mutuelle stator - rotor	0.572 2	$P_{ft+vt} (W)$	Pertes frottement /ventilation	1.1697
$R_r' (\Omega)$	Résistance - rotor ramenée au stator	7.601 3	$Z_{rt} (mm)$	Largeur de la dent rotorique	27.50
$l_{\sigma r}' (H)$	Inductance de fuite rotor ramenée au stator	0.028 4	$h_{rt} (mm)$	Hauteur de la dent rotorique	15.9
$l_{\sigma s} (H)$	Inductance de fuite stator	11.6	$\delta (mm)$	Epaisseur de l'entrefer	0.5
$D_{er} (mm)$	Diamètre extérieur rotorique	119	$B_{hj2} (T)$	Induction - culasse Rotor	0.5025
$B_{hj1} (T)$	Induction - culasse statorique	1.300 0	$B_{t2} (T)$	Induction - tête dent rotor	1.1873
$B_{t1} (T)$	Induction -tête dent stator	0.761 0	Ratio	Nombre encoches / Nombre de bars	36/30

$B_{\delta}(T)$	Induction dans l'entrefer	0.55	$\eta$	Rendement calculé	0.7485
$\cos \varphi$	Facteur de puissance	$\frac{0.800}{8}$	$T_{star} / T_n$	-----	1.1967

**Tab. 3.3** Résultats du programme de la conception (Tôles d'acier 3.6W/kG)

### • Limites des variables de conception

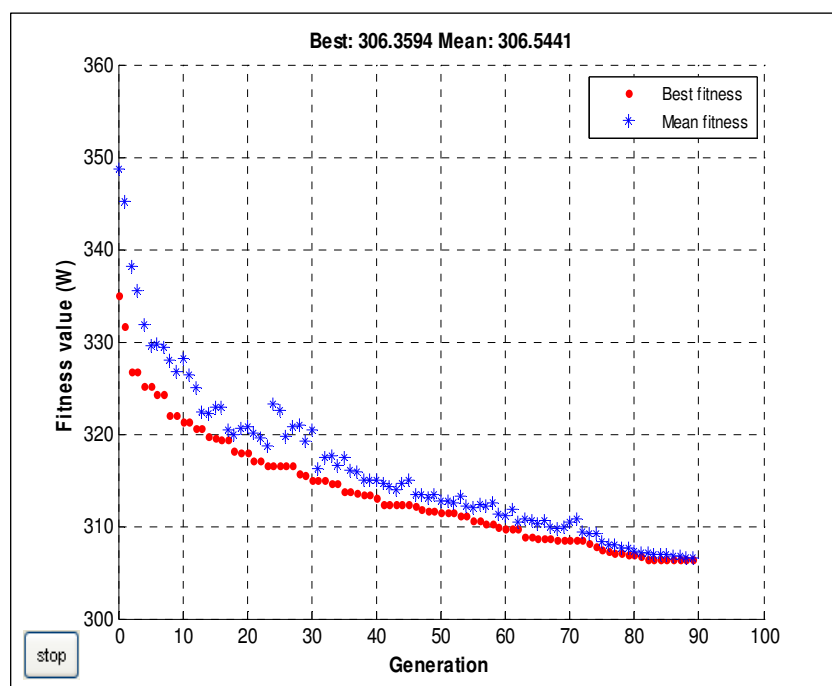
Les résultats du Tab. 3.3, permettent de définir l'espace de recherche pour chaque paramètre en vue d'optimiser la conception de la machine, Tab. 3.4

Abrév.	Paramètres	Unité	Espace de recherche
$D$	Diamètre d'alésage	$mm$	$120 \leq D \leq 122$
$\delta$	Epaisseur de l'entrefer	$mm$	$0.5 \leq \delta \leq 1$
$h_{j1}$	Epaisseur de la culasse statorique	$mm$	$15.9 \leq h_{j1} \leq 16$
$\lambda$	Rapport géométrique	-----	$0.75 \leq \lambda \leq 1$
$h_{r1}$	Hauteur de la dent statorique	$mm$	$11.6 \leq h_{r1} \leq 11.8$
$MW$	Poids de la machine	kG	$10 \leq M \leq 15$

**Tab. 3.4** Paramètres de conception et leurs limites

### • Résultats d'optimisation

#### a) En utilisant tôles d'acier (Siemens Martin), [21].



**Fig. 3.2** Moyennes et meilleures valeurs de la fonction objective après l'optimisation en utilisant tôles d'acier (Siemens Martin)

La Fig. 3.2 montre, la meilleure et la moyenne valeur pour la fonction objective, dont la solution optimale est atteinte après 90 générations. Les valeurs obtenues pour chaque paramètre d'optimisation sont reportées dans le Tab. 3.5. On remarque aussi que l'entrefer reste minimal et les autres paramètres respectent leurs limites.

Abrév.	Paramètres	Unité	Solutions
$D$	Diamètre d'alésage	$mm$	121.6
$\delta$	Epaisseur de l'entrefer	$mm$	0.6
$h_{j1}$	Epaisseur de la culasse statorique	$mm$	15.9
$\lambda$	Rapport géométrique	-----	0.8594
$h_{t1}$	Hauteur de la dent statorique	$mm$	11.7
$MW$	Poids de la machine	kG	12.1848
$\eta_{Opt}$	Optimized efficiency	-----	0.7822

Tab. 3.5 Résultats d'optimisation (Siemens Martin)

b) En utilisant tôles d'acier (2.3W/kG), [21].

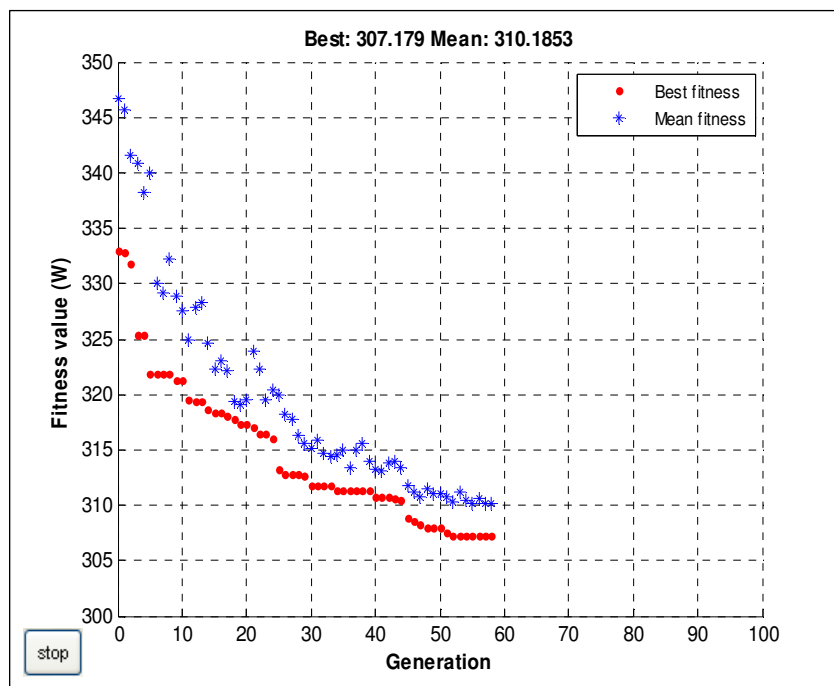


Fig. 3.3 Moyennes et meilleures valeurs de la fonction objective après l'optimisation en utilisant tôles d'acier (2.3 W/kG)

Suivant les résultats du Tab. 3.6, l'algorithme donne des résultats acceptables dans une courte durée, cela est indiqué par une valeur très importante de la fonction objective ( $\eta = 78.1\%$ ) sans aucune contrainte.

Abrév.	Paramètres	Unité	Solutions
$D$	Diamètre d'alésage	$mm$	120.7
$\delta$	Epaisseur de l'entrefer	$mm$	0.7
$h_{j1}$	Epaisseur de la culasse statorique	$mm$	15.9
$\lambda$	Rapport géométrique	$mm$	0.9767
$h_{t1}$	Hauteur de la dent statorique	-----	11.9
$MW$	Poids de la machine	$mm$	13.66
$\eta_{Opt}$	Optimized efficiency	kG	0.7817

Tab. 3.6 Résultats d'optimisation (2.3 W/kG)

c) En utilisant tôles d'acier (3.6 W/kG), [21].

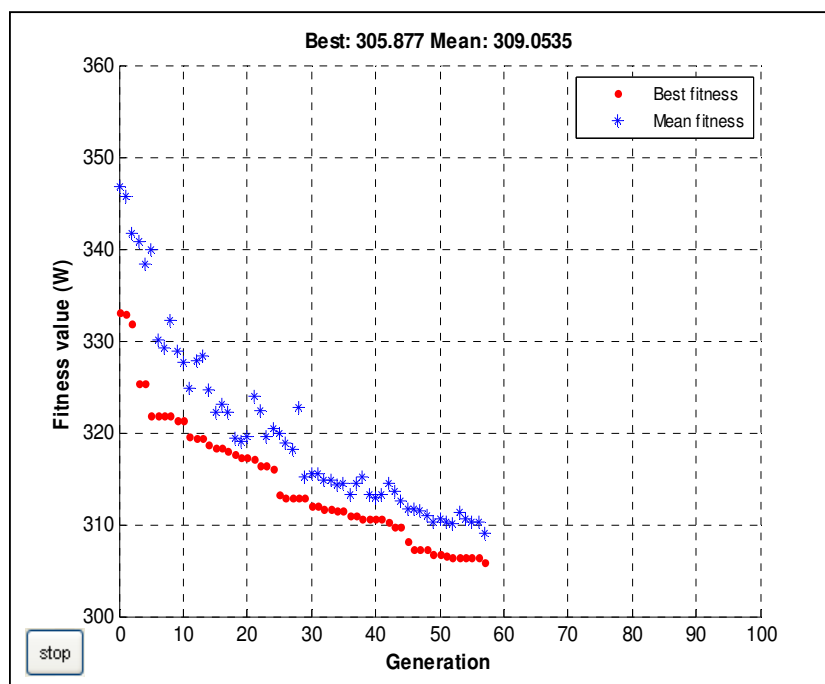


Fig. 3.7 Moyennes et meilleures valeurs de la fonction objective après l'optimisation en utilisant tôles d'acier (3.6 W/kG)

La Fig. 3.7, présente une caractéristique principale de ce genre de conception. Sachant que la valeur moyenne de la fonction à optimiser en fonction de nombre de générations est augmentée à ( $\eta = 78.24\%$ ), mais le poids de la machine atteint sa valeur maximale.

<b>Abrév.</b>	<b>Paramètres</b>	<b>Unité</b>	<b>Solutions</b>
$D$	Diamètre d'alésage	$mm$	120.6
$\delta$	Épaisseur de l'entrefer	$mm$	0.7
$h_{j1}$	Épaisseur de la culasse statorique	$mm$	15.9
$\lambda$	Rapport géométrique	-----	0.9316
$h_{t1}$	Hauteur de la dent statorique	$mm$	11.9
$MW$	Poids de la machine	kG	14.002
$\eta_{Opt}$	Optimized efficiency	-----	0.7824

**Tab. 3.7** Résultats d'optimisation (3.6 W/kG)

#### d) Discussion

Le Tab. 3.8 montre une comparaison pour les trois conceptions.

	Poids de la machine		Rendement		Nombre de générations
	Machine initiale	Après l'optimisation	Machine initiale	Après l'optimisation	
<b>Tôles d'acier</b> (3.6 W/kG)	<b>12.410</b>	<b>14.002</b>	<b>0.7485</b>	<b>0.7824</b>	<b>58</b>
<b>Tôles d'acier</b> (Siemens Martin)	-----	<b>12.184</b>	-----	<b>0.7822</b>	<b>90</b>
<b>Tôles d'acier</b> (2.3 W/kG)	-----	<b>13.66</b>	-----	<b>0.7817</b>	<b>59</b>

**Tab. 3.8** Comparaison des résultats

Selon ces résultats, la deuxième conception est sélectionnée. Cependant, si la valeur de la fonction objective et le nombre de générations sont utilisés comme critère de choix, le troisième

cas est le mieux placé. Tandis que, le premier cas est choisi, puisqu'il ouvre une solution qui est un compromis entre le rendement et le poids de la machine.

### **3.10- Conclusion**

Le but principal de ce chapitre, est d'optimiser la conception d'une machine asynchrone en utilisant les algorithmes génétiques. Les paramètres d'optimisation sont : Diamètre d'alésage, épaisseur de l'entrefer, le rapport géométrique, hauteur de la dent statorique, et épaisseur de la culasse statorique afin de minimiser le poids de la machine et maximiser son rendement. Cela a été appliqué avec succès sur une machine de 1.1 kW. Les résultats de cette optimisation ont démontré clairement que le rendement de la machine a été amélioré considérablement par cette procédure d'optimisation, d'où l'intérêt de ce travail dans le domaine de la conservation d'énergie.

