



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux électriques

Réf :

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

***Gestion optimale de l'énergie dans
les réseaux électriques en présence
des sources à énergie éolienne***

Présenté par :

Mr.FETTAH Abderrahim

Soutenu le : 02 juin 2016

Devant le jury composé de :

Mr.BENMEDDOUR Mostefa	MCB	Président
Mr.SALHI Ahmed	MCB	Encadreur
Mme.LAALA Widad	MAA	Examineur

Année universitaire : 2015-2016

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



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : **Réseaux électriques**

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

*Gestion optimale de l'énergie dans
les réseaux électriques en présence
des sources à énergie éolienne*

Présenté par :

Mr.FETTAH Abderrahim

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. SALHI Ahmed

Avis favorable du Président du Jury

Dr. BENMEDDOUR Mostafa

Cachet et signature



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux Electriques

Thème

Gestion optimale de l'énergie dans les réseaux électriques en présence des sources à énergie éolienne

Proposé et dirigé par : Dr. SALHI Ahmed

RESUME

La gestion optimale de l'énergie dans les réseaux électriques revient à trouver la répartition adéquate de la puissance totale entre toutes les centrales électriques alimentant ce réseau afin de satisfaire la puissance demandée des abonnés plus les pertes de transmission à condition que cette répartition doive essentiellement assurer l'électricité avec le minimum de coût de production et d'émission des gaz toxiques. On parle alors du dispatching économique et environnemental.

L'opérateur de réseau électrique est toujours en confrontation avec plusieurs contraintes, souvent contradictoires. C'est dans ce cadre que notre travail vient pour trouver un compromis entre le coût de production, l'émission des gaz toxiques dans un réseau conventionnel en intégrant des sources à énergie éolienne c'est-à-dire qu'on minimise la fonction objective coût des centrales conventionnelles comme première étape puis on ajoute des sources à énergie éolienne en deuxième étape et enfin on s'intéresse au coût global en ajoutant le coût de la taxe sur les émissions des gaz toxiques où on a utilisé une technique d'optimisation multi-objectif à base des algorithmes génétiques. Cette technique est appliquée sur le modèle connu IEEE-30 jeux de barres avec 06 unités de production.

Mots clés: Gestion optimale, Dispatching économique, Algorithme génétique, Fonction objective, IEEE.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier le bon Dieu Tout Puissant pour toutes les merveilles qu'il fait dans ma vie et pour m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

Ce mémoire de fin de formation est l'aboutissement des efforts conjugués d'un certain nombre de personnes qui n'ont apporté une assistance morale, technique et matérielle.

Qu'il me soit donc permis de m'acquitter d'un devoir, celui de présenter mes sincères remerciements à toutes ces personnes.

*Alors, je présente mes remerciements à Monsieur **SALHI** Ahmed, mon encadreur qui a manifesté son entière disponibilité pour m'aider, et n'a ménagé aucun effort pour l'aboutissement de ce travail.*

Nous tiens à remercier aussi la composante de la jury président et membres de l'intérêt dont ils font preuve à mon égard pour lire ce mémoire et en assistant à ma soutenance.

*Mes remerciements vont également à tous les enseignants de notre département de génie électrique-Biskra qui ont toujours donné le meilleur d'eux-mêmes afin de nous assurer une formation de qualité en particulier Monsieur **NATMI** Djemai.*

J'exprime mes vifs remerciements à ma famille qui est toujours proche de moi par leur encouragement et par leur soutien.

Enfin j'invite tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, à trouver dans le même hommage le témoignage de mon estime et de ma gratitude.

*« Une personne qui n'a jamais commis d'erreur...
...n'a jamais tenté d'innover »
Albert Einstein*

SOMMAIRE

Titre	Page
Remerciement	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des Symboles et Acronymes	
Résumé	
Sommaire	
Introduction générale	

Chapitre I: Dispatching économique et environnemental

Introduction	2
1.1 Description d'un réseau électrique.....	2
1.1.1 Définition.....	2
1.1.2 Structure des réseaux électriques.....	3
1.1.3 Unité de production.....	3
1.1.3.1 Type des centrales de production.....	3
1.1.3.2 Stratégie de fonctionnement des centrales de production.....	3
1.2 Stratégie de planification.....	3
1.3 Dispatching Economique (DE).....	4
1.3.1 Objectif du dispatching économique.....	5
1.4 Dispatching environnemental.....	5
1.5 Optimisation mono et multi-objective.....	5
1.5.1 Définition de l'optimisation.....	5
1.5.1.1 Fonction Objective.....	5
1.5.1.2 Variables de décision.....	6
1.5.1.3 Contraintes.....	6
1.5.2 Formulation d'un problème d'optimisation mono-objectif.....	6
1.5.2.1 Minimum global.....	6
1.5.2.2 Minimum local.....	6
1.5.3 Formulation du problème de l'optimisation multi objectif.....	7
1.5.4 Optimisation de l'écoulement de puissance.....	8
1.5.5 Formulation du problème de l'OPF.....	8
1.5.5.1 Fonctions objectives.....	9
1.5.5.2 Contraintes d'égalité.....	10
1.5.5.3 Contraintes d'inégalité.....	11
1.5.6 Méthodes de résolution de problèmes d'optimisation.....	12
1.5.6.1 Méthodes déterministes.....	12
1.5.6.2 Méthodes stochastiques.....	12
1.5.6.3- Algorithmes évolutionnaires.....	13
Avantages.....	14
Inconvénients.....	14
Conclusion.....	15

Chapitre II: Les algorithmes génétiques

Introduction.....	17
Historique.....	17
2.1 Principe.....	17
2.2 Présentation.....	18
2.2.1 Principe de base d'un AG standard.....	18
2.2.2 Les principales opérations d'un AG.....	20
2.2.2.1 Sélection.....	20
2.2.2.2 Croisement	21
2.2.2.3 Mutation.....	21
2.2.2.4 Codage.....	22
2.2.3 Paramètres d'un AG.....	22
2.2.4 Processus d'évolution des générations : générationnel, stationnaire et élitiste.....	23
2.2.5 Opérateurs de croisement.....	23
2.3 AG en îlots (ou avec dômes).....	24
2.4 AG pour l'optimisation multi objective.....	27
2.5 Ecoulement de puissance optimal par l'algorithme génétique.....	27
2.5.1 Algorithme génétique dans l'optimisation.....	28
Avantages de GA.....	29
Inconvénients de GA.....	30
Conclusion.....	30

Chapitre III : Intégration de l'énergie éolienne dans le réseau électrique

Introduction.....	32
Historique.....	32
3.1 Situation énergétique mondiale.....	33
3.2 Descriptif et qualités de l'énergie éolienne.....	33
3.2.1 Définition de l'énergie éolienne.....	33
3.2.2 Principaux composants d'une éolienne.....	34
3.2.2.1 Le mât.....	34
3.2.2.2 Les pales.....	34
3.2.2.3 La nacelle.....	35
3.3 Différents types d'éoliennes.....	35
3.3.1 Eoliennes à axe vertical.....	35
3.3.2 Eoliennes à axe horizontal.....	36
a. Avantages.....	36
b. Inconvénient.....	36
3.3.4 Différentes technologies d'éoliennes.....	37
3.3.4.1 Fonctionnement à vitesse fixe.....	37
3.3.4.2 Fonctionnement à vitesse variable.....	37
3.4 Types de régulation de puissance.....	38
3.4.1 Un système à décrochage aérodynamique « stall ».....	38
3.4.2 Un système d'orientation des pales « pitch ».....	39
3.5 Intérêt de la vitesse variable.....	41
3.6 Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne à grande puissance.....	41
3.6.1 Puissance éolienne disponible.....	42
3.6.2 Puissance éolienne récupérable (Théorème de Betz).....	43
3.6.3 Caractérisation horizontale de la vitesse de vent.....	45
3.6.4 Distribution de Weibull.....	46

3.7 Impacts de l'énergie éolienne.....	46
3.7.1 Couplage au réseau.....	46
3.7.2 Fluctuations de puissance.....	48
3.7.3 Comportement sur creux de tension.....	48
3.7.4 Problématique de l'intermittence et de l'intégration de l'éolien dans le marché.....	48
Conclusion.....	48

Chapitre IV : Application résultats et interprétations

Introduction.....	49
4.1 Modèle d'étude.....	49
4.2 Description du travail.....	49
4.2.1 Coût de carburant du générateur classique.....	50
4.2.2 Fonction de coût de fonctionnement du parc éolien.....	50
4.2.3 Fonction de coût à cause de la surgénération.....	50
4.2.4 Fonction de coût à cause de la sous-génération.....	50
4.2.5 Partie pratique.....	52
4.2.6 Programmation sous MA TLAB.....	53
4.2.7 Résultats et interprétation.....	53
4.2.7.1 Première étape.....	53
4.2.7.2 Deuxième étape.....	56
4.2.7.3 Troisième étape.....	59
Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	
Références bibliographiques.....	

Liste des figures

Chapitre I

Figure 1.1	Structure des réseaux électriques.....	2
Figure 1.2	Stratégie du dispatching.....	4
Figure 1.3	Illustration des différents minima d'une fonction mono-objective.....	7
Figure 1.4	Diagramme de la Combustion.....	10
Figure 1.5	Schéma illustrant les différentes méthodes stochastiques.....	13
Figure 1.6	Représentation simplifiée d'une approche stochastique.....	14

Chapitre II

Figure2.1	Vue d'ensemble d'un algorithme génétique.....	18
Figure 2.2	Organigramme des AG standard.....	19
Figure2.3	Représentation d'une sélection par tournoi d'individus pour un critère de maximisation (chaque individu représente une solution.....	20
Figure2.4	Représentation d'un croisement en un point de deux chaînes.....	21
Figure2.5	Représentation d'une mutation de bits dans une chaîne	21
Figure2.6	Représentation d'un croisement en deux points.....	24
Figure 2.7	Représentation d'un accroissement uniforme.....	24
Figure2.8	Représentation d'un AG en îlots	25
Figure2.9	Processus d'évolution dans un modèle d'AG en îlots, générationnel	26
Figure2.10	Schéma fonctionnel d'algorithme génétique.....	29

Chapitre III

Figure3.1	Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	34
Figure 3.2	Principaux composants d'une éolienne	35
Figure3.3	Flux d'air sur un profil de pale " stall "	39
Figure3.4	Variation de l'angle de calage d'une pale	40
Figure3.5	Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique.....	41
Figure3.6	Zones de fonctionnement de la turbine	42
Figure3.7	Veine d'air traversant la zone balayée par les pales d'une éolienne.....	43
Figure3.8	Évolution de F_{cen} fonction de a [39]	44
Figure3.9	Facteur de capacité pour différents types d'éoliennes	45
Figure 3.10	Evolution des courants d'une MAS à cage lors d'une connexion brutale au réseau. [GAR 09].....	47

Chapitre IV

Figure4.1	Optimisation de la fonction coût des unités conventionnelles.....	56
Figure 4.2	Optimisation de la fonction coût total y compris les unités conventionnelles et les sources à énergie éoliennes avec $n_w = 15$	58

Figure4.3	Optimisation de la fonction coût total des unités conventionnelles y compris des sources à énergie éoliennes $n_w = 20$	59
Figure4.4	Optimisation de la fonction coût total des unités conventionnelles y compris des sources à énergie éoliennes $n_w = 25$	59
Figure4.5	Optimisation de la fonction coût total des unités conventionnelles y compris des sources à énergie éoliennes avec pénalité sur les émissions des gaz	61

Liste des Tableaux

	Page
Tableau 2.1 Code de Gray et code binaire pour une chaîne à trois bits	22
Tableau 4.1 Coefficients de la fonction coût et les capacités des générateurs	54
Tableau 4.2 Coefficients d'émission des gaz toxiques	54
Tableau 4.3 Résultats d'optimisation de la fonction coût sans considération des sources à énergie éolienne	55
Tableau 4.4 Résultats d'optimisation de la fonction coût total y compris les unités conventionnelles et les sources à énergie éoliennes	57
Tableau 4.5 Résultats d'optimisation de la fonction coût total des unités conventionnelles y compris des sources à énergie éoliennes avec pénalité sur les émissions des gaz	60

Liste des Symboles et Acronymes

Symboles	ACRONYMES
DE	Dispatching économique
AG	Algorithme génétique
P_{Gi}	La puissance active électrique générée par la centrale i(W).
V_{imax}	La tension maximale de jeu de barre i (V).
P_{Gmin}	La puissance active minimale générer dans le réseau (W).
V_{imin}	La tension minimale de jeu de barre i (V).
P_{Gmax}	La puissance active maximale générée dans le réseau (W).
Q_{Gmax}	La puissance réactive minimale générée dans le réseau (VAR).
λ	Multiplicateur de Lagrange concernant les contraintes d'égalités (lambda).
Q_{Gmin}	La puissance réactive maximale générée dans le réseau (VAR).
S_i	La puissance apparente de jeu de barre i (VA).
FC	La fonction optimisée de cout (\$/h).
FE	La fonction optimisée d'émission (kg/h).
\bar{V}_i	La valeur complexe de la tension de jeu de barre i (V).
g(x)	les contraintes.d'égalité
g(x)	les contraintes.d'inégalité
x	le vecteur des variables de décision dans l'espace de recherche Ω .
n_g	le nombre des générateurs inclure les jeux de barres de contrôle.
x	Le vecteur des variables d'état.
a_i, b_i, c_i	Les coefficients des puissances générées pour i générateur.
U	Le vecteur des variables de contrôle.
P_i^{res}, Q_i^{res}	sont les puissances actives et réactive indiqué pour les JB(PQ).
 V 	Le module de la tension.
P_m, P_m^i	les puissances actives calculé et indiqué pour les JB (PV).
S_k	La puissance apparente de jeu de barre k (VA).
S_{Dk}	La puissance apparente demander de jeu de barre k (VA).
S_{Gk}	La puissance apparente générer de jeu de barre k (VA).
I_i	Le courant de jeu barre i (A).
y_{ij}	L'admittance entre les jeux de barre i et j.
U	Le vecteur des variables de contrôle.
 V 	Le module de la tension.
w_{av}	L'énergie éolienne disponible

W_{\max}	La valeur maximale de l'énergie éolienne produite
W_{\min}	La valeur minimale de l'énergie éolienne produite
OPF	Optimal Power Flow (Ecoulement de Puissance Optimal)
P_L	Les pertes de transport énergie électrique (W).
P_D	Puissance demandé
C_t	La fonction de coût total (\$/h).
C_i	Coût de production de la centrale i, en (\$/h).
ai, bi, ci	Coefficients de la courbe du coût quadratique du générateur i.
P_c	Probabilité de croisement
P_m	Probabilité de mutation
t	Nombre de la population de génération.
ℓ	La longueur de chaîne
A_i	Appartenance de génération i.
θ_i	Arguments des tensions aux niveaux de jeux de barre (rad).
δ_{ij}	Arguments des tensions aux niveaux des lignes (rad).
G_{ij}	Conductances des lignes ($1/\Omega$).
B_{ij}	Suceptances des lignes ($1/\Omega$).
ε	Tolérance choisie (précision de calcul).
F	Fonction objective appelée « fitness » (\$/h) .
P_e	Puissance électrique active (W)
Q_e	Puissance électrique réactive (VAR)
V	Tension terminale du générateur (v)
$F(x)$	Fonction objective (fonction coût) .
X	Vecteur des variables d'états.
U	Vecteur des variables de contrôle.
λ	Multiplicateur de lagrange concernant les contraintes d'égalités (lambda).
β	Multiplicateur de lagrange concernant les contraintes d'inégalités.
JB	Jeux de barres.

ملخص

التسيير الأمثل للطاقة في المنظومة الكهربائية تعني العثور على التوزيع المناسب للاستطاعة الكلية بين جميع محطات الطاقة المغذية لهذه الشبكة لتلبية طلب المشتركين مع الأخذ بعين الاعتبار الضياعات في الخطوط وفي هذه الحالة ينبغي على هذا التوزيع أساساً أن يوفر الكهرباء بأقل تكلفة إنتاج وأقل انبعاثات الغازات السامة وهذا ما يسمى بالتوزيع الاقتصادي البيئي. مشغلات الشبكة دائماً يكون في المواجهات مع العديد من المعوقات، غالباً ما تكون متناقضة في هذا السياق، عملنا هو إيجاد حلول وسط بين تكلفة الإنتاج، انبعاثات الغازات السامة في الشبكة التقليدية من خلال دمج مصادر لطاقة الرياح وهذا يعني انتقالاً من تكلفة الدالة الهدف لمحطات الطاقة التقليدية كخطوة أولى، ومن ثم إضافة مصدر لطاقة الرياح كخطوة الثانية، وأخيراً، ننظر إلى التكلفة الإجمالية بوضوح أكثر تكلفة ضريبة انبعاثات الغازات السامة، حيث نستخدم تقنية الأمثلة متعددة الأهداف لإعتماد على الخوارزميات الجينية يتم تطبيق هذه التقنية على النموذج المعروف IEEE 30 قضيب تجميع ستوحدات إنتاج.

الكلمات المفتاحية: الإدارة المثلى، التوزيع الاقتصادي، الخوارزمية الجينية، دالة موضوعية، IEEE.

Abstract

The optimal energy management in electric power systems means finding the total power repartition between all power plants supplying this network to satisfy the power demand of consumers with power losses in lines provided that such repartition should essentially supply electricity with minimum generation cost and emission of toxic gases. This is called economic and environmental dispatch. The electrical power system operator is always in confrontation with several constraints, often contradictory. In this context, our work is to find a compromise between the cost of production, the emission of toxic gases in a conventional grid by integrating a wind energy source that is minimizes the objective function of conventional power generating units cost as a first step, then a source for wind energy in the second step, and finally, we look at the global cost by adding the tax cost on emissions of toxic gases where a multi-objective optimization technique was used based on genetic algorithms. This technique is applied on the well-known IEEE 30 Bus test system with 6 generating units.

Key words: Optimal management, economic dispatching, genetic algorithm, objective function, IEEE.

Introduction générale

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel.

Le système électrique est un réseau-source alimentant un très grand nombre de clients à partir d'un nombre de centrales de production. L'énergie produite par les centrales transite sur les lignes de haute et très haute tensions du réseau de transport maillé sur une zone couvrant un ou plusieurs états, est acheminée sur des réseaux de distribution de moyennes et basses tensions dont l'arborescence permet d'atteindre les clients finals. L'énergie électrique est produite en même temps qu'elle est consommée; donc, en permanence, la production doit s'adapter à la consommation. Il faut, donc, ajuster les puissances active et réactive des générateurs interconnectés dans un réseau électrique dans leurs limites admissibles afin de satisfaire la charge électrique fluctuante avec un coût minimal et parfois avec une certaine protection d'environnement le tout en gardant les pertes des puissances dans leurs limites. C'est le concept de l'écoulement de puissance optimal (OPF).

L'augmentation des installations de production d'énergie d'origine renouvelable a conduit à de nouveaux défis pour les compagnes d'électricité. Ces défis concernent particulièrement l'intégration de ces sources décentralisées dans un réseau électrique existant, compte tenu des problèmes qui leur sont associés et notamment, l'intermittence de la puissance produite.

L'énergie éolienne est devenue une source importante qui s'intègre de plus en plus pour la génération de l'énergie électrique avec la croissance de la demande en électricité, ce qui fait de cette énergie, sous forme de parc ou ferme, une candidate de plus en plus populaire. En effet, elle a l'avantage de réduire les émissions de gaz polluants et la conservation des réserves irremplaçables de fuel. L'intégration de l'énergie éolienne doit être planifiée au fur et à mesure avec la mise au point des marges de production des centrales classiques (thermiques, nucléaires et hydrauliques). Ce qui nécessite une coordination entre le problème d'intégration de l'énergie éolienne et le problème de Dispatching Economique (DE).

Le problème du dispatching économique consiste à déterminer les niveaux de production de l'ensemble des générateurs qui garantissent l'équilibre production consommation au moindre coût. Le développement rapide des techniques du calcul numérique a permis de maîtriser ce

problème en utilisant des méthodes classiques ou déterministes et des méthodes stochastiques ou métaheuristiques à base d'intelligence artificielle qui ont abouti à élaborer plusieurs algorithmes de calcul permettant de déterminer la quantité d'énergie à générer par les centrales et à transférer à travers chaque nœud et chaque liaison afin de répondre aux exigences des consommateurs aussi économiquement que possible, tout en respectant les contraintes du système et de toutes les centrales.

La puissance générée par une centrale éolienne n'est pas maniable de la même manière que celle générée par des centrales conventionnelles, parce qu'elle dépend de la vitesse du vent qui est liée à des paramètres climatologiques et micro-météorologiques.

Dans ce mémoire, nous étudions l'effet de l'introduction des fermes d'énergie éolienne dans le réseau électrique sur le coût et sur l'environnement en appliquant l'algorithme génétique.

Afin d'atteindre les objectifs de notre travail et cerner tous les aspects de cette étude, ce mémoire est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, on donnera quelques définitions de base et formulation du dispatching économique et environnemental ainsi que les méthodes de résolution de ces derniers.

Cependant, dans le deuxième chapitre, on abordera les principes des algorithmes génétiques et leurs applications à l'optimisation mono et multi objective

Alors le troisième chapitre traitera l'intégration d'une source à énergie éolienne et son effet sur le réseau conventionnel en matière de coût, émission des gaz toxiques, puissances générée et pertes.

Par contre, le quatrième chapitre représente la partie pratique qui consiste à l'étude du dispatching économique et environnemental sur un réseau test composé par 06 unités de production conventionnelles avec intégration des fermes éoliennes sans prendre en compte l'emplacement des centrales.

Finalement, on a clôturé ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I

DÍSPATCHING

ECONOMIQUE

et

ENVIRONNEMENTAL

Introduction

L'exploitation des réseaux électrique pose de nombreux problèmes d'ordre technique et économique. Les programmes de gestions élaborés par les experts doivent garantir en tout temps et

en tout lieu la couverture de l'énergie demandée, d'assurer une qualité acceptable de la puissance livrée et de procurer une sécurité d'alimentation élevée avec un coût aussi faible que possible.

En l'absence de possibilité de stockage de l'énergie à grande échelle, il est indispensable de maintenir à tout instant l'équilibre entre la production et la consommation avec minimisation du coût des unités de production et les émissions des gaz toxiques, ce processus de gestion optimale est appelé dispatching économique et environnemental.

1.1 Description d'un réseau électrique

1.1.1 Définition

On appelle réseau électrique l'ensemble des infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production (centrales électriques), vers les consommateurs d'électricité, la structure des réseaux électriques est présentée dans la figure 1.1.

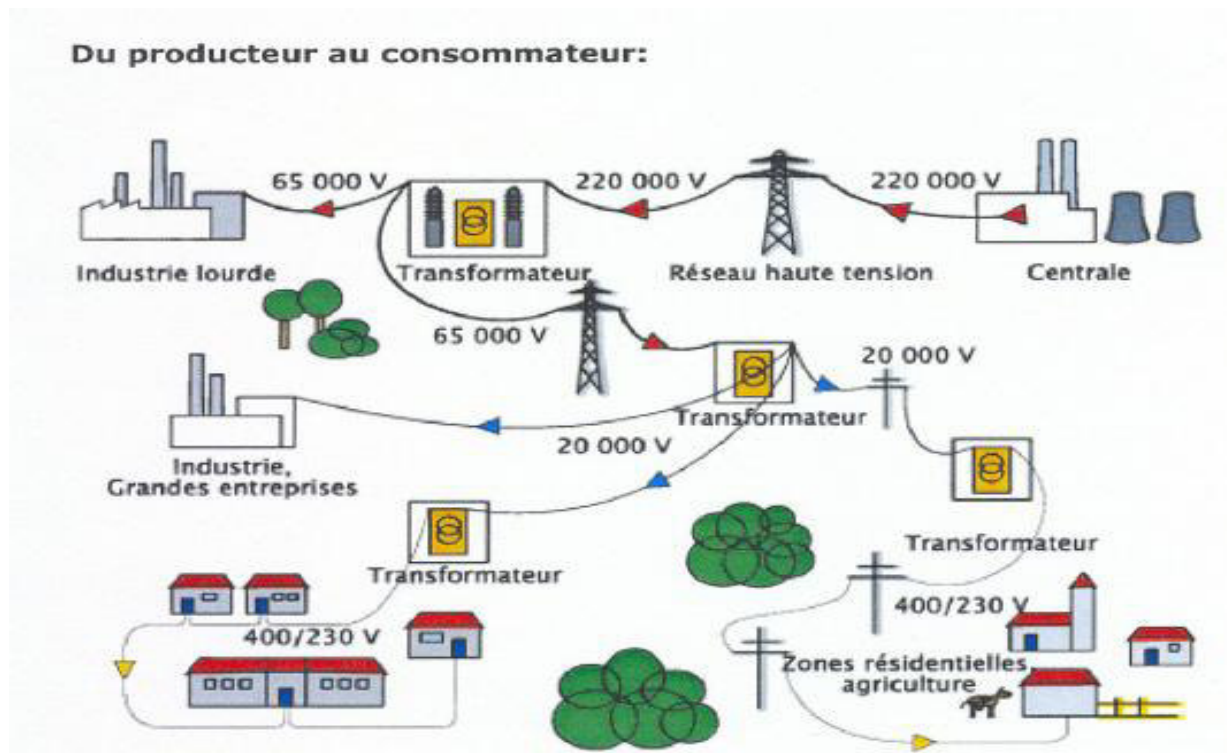


Figure 1.1 Structure des réseaux électriques

1.1.2 Structure des réseaux électriques

- **Réseau de transport** : a pour mission principale d'assurer l'acheminement de l'énergie des centres de production vers les centres de consommation.

- **Réseau d'interconnexion** : est un réseau de transport qui a la particularité d'assurer l'échange énergétique entre les différentes zones géographiques.
- **Réseau de répartition** : est un réseau intermédiaire qui a pour mission d'assurer la livraison de l'énergie à des grands consommateurs.
- **Réseau de distribution** : a pour rôle de fournir aux réseaux d'utilisation la puissance dont ils ont besoin. L'énergie électrique fournie aux consommateurs (clients) par l'intermédiaire du réseau de distribution selon des niveaux de tension normalisés : 30 kV-10 kV et 5.5 kV.

1.1.3 Unité de production

L'alternateur synchrone constitue l'élément principal dans la chaîne de production de l'électricité. L'alternateur est entraîné par des turbines à vapeur, à gaz ou hydraulique en fonction de l'énergie primaire utilisée. Les centrales sont connectées sur le réseau de transport via des transformateurs élévateurs.

1.1.3.1 Type de centrales de production

- Les centrales nucléaires
- Les centrales thermiques
- Les centrales hydrauliques
- Les centrales à base des énergies renouvelables

1.1.3.2 Stratégie de fonctionnement des centrales de production

- Les centrales de base : destinées à alimenter la charge de base (la plus importante)
- Les centrales intermédiaires : destinées pour alimenter la puissance intermédiaire
- Les centrales de pointe : destinées pour alimenter la puissance de pointe
- Les centrales de réserve : interviennent en cas de maintenance

1.2 Stratégie de planification

La planification et la gestion optimale des réseaux électriques est un problème multi objectif complexe qui nécessite des méthodes d'optimisation robustes et dynamiques.

- Minimisation des coûts de production d'énergie électrique, connu sous le nom dispatching économique statique ou dynamique.
- Minimisation de l'émission des gaz toxiques.
- Minimisation des pertes de transport.
- Minimisation de la déviation de tension.

- Amélioration de la stabilité de tension.
- Amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques.
- Coordination du système de protection avec considération des énergies renouvelables.

Il faut noter que ces fonctions objectives sont à minimiser ou maximiser individuellement ou simultanément.[MAH 14]

1.3 Dispatching Economique (DE)

Pour assurer la continuité de fourniture de l'électricité aux abonnés, tous les réseaux électriques modernes de transport sont interconnectés où plusieurs producteurs (centrales électriques) sont liées entre elles, mais la gestion de toutes ces centrales a exigé la création d'un outil de coordination appelé le dispatcheur, comme son nom l'indique ce dispatcheur sert à répartir la puissance totale générée.

Le dispatching économique revient à trouver la répartition de puissance totale entre toutes les centrales électriques alimentant ce réseau afin de satisfaire la puissance demandée des abonnés plus les pertes de puissance dans les lignes à condition que cette répartition doive essentiellement assurer l'électricité avec le minimum de coût de production.

Le système énergétique (unités de production, système de control et de protection, station de transport et de distribution) doit assurer instantanément et d'une manière dynamique la vérification du bilan de puissance qui est :

La somme des puissances produites doit être égale à la somme des puissances consommées avec considération des pertes. La stratégie du dispatching économique est présentée dans la figure 1.2. L'équilibre de puissances permet de garder la fréquence et la tension dans leurs limites admissibles.

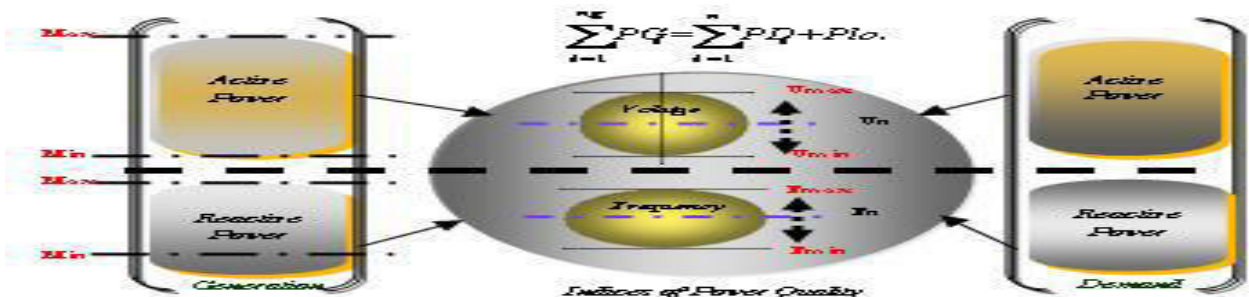


Figure 1.2 Stratégie du dispatching économique

1.3.1 Objectif du dispatching économique

L'objectif principal du dispatching économique est de trouver la contribution en puissance de chaque groupe de production du système électrique, de sorte que le coût total de production soit

minimisé que possible pour n'importe quelle condition de charge tout en respectant les contraintes physiques de ces générateurs.

Pour un système électro-énergétique avec n_g unités de production, le coût total du combustible est simplement égal à la somme des coûts élémentaires du combustible des différentes unités.

1.4 Dispatching environnemental

Pour remédier au problème de la pollution de l'atmosphère causée principalement par l'émission des gaz toxiques dégagés par les centrales électriques à base d'hydrocarbures le remplacement de ces sources classiques par des centrales de sources renouvelables présente une solution idéale mais en réalité elle est un peu utopique.

Une autre alternative vient de s'imposer vu qu'elle n'exige pas des investissements supplémentaires, cette solution revient à chercher une répartition des puissances générées entre les différentes centrales alimentant le réseau électrique de telle façon que ces centrales dégagent le minimum de gaz toxiques. [NAI 15]

1.5 Optimisation mono et multi-objective

1.5.1 Définition de l'optimisation

Un problème d'optimisation se définit simplement comme la recherche de l'optimum (minimum ou maximum) d'une fonction f donnée, en respectant certaines conditions préalablement imposées (contraintes) [SRI 94].

1.5.1.1 Fonction Objective

C'est le nom donné à la fonction f (on l'appelle aussi fonction de coût ou critère d'optimisation). C'est cette fonction que l'algorithme d'optimisation va devoir optimiser (trouver un optimum). Cette fonction dite « Objective » peut être un coût (minimiser), profit (maximiser), production (maximiser). Les fonctions objectives sont diverses selon le problème à optimiser.

1.5.1.2 Variables de décision

Elles sont regroupées dans le vecteur \vec{x} . C'est en faisant varier ce vecteur que l'on recherche un optimum de la fonction f , elles peuvent être des variables de contrôle ou des variables d'état.

1.5.1.3 Contraintes

Les contraintes représentent des conditions sur les variables de décision qui doivent les satisfaire. Ces contraintes sont souvent des contraintes d'inégalité ou d'égalité et permettent en général de limiter l'espace de recherche et le respect des conditions techniques du problème à traiter.

1.5.2 Formulation d'un problème d'optimisation mono-objectif

Un problème d'optimisation mono-objectif est présenté sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser } f(x) \\ \text{Sous les contraintes : } g(x) = 0 \\ \qquad \qquad \qquad \text{et} \\ \qquad \qquad \qquad h(x) \leq 0 \end{array} \right. \quad (1.1)$$

$g(x)$: Contraintes d'égalité ;

$h(x)$: Contraintes d'inégalité. Avec $x \in R^n$

1.5.2.1 Minimum global

On a la fonction $f : \Omega \in R^n \rightarrow R$, tel que $\Omega \neq \emptyset$. Pour $x^* \in \Omega$,

On dit que x^* est un optimum global si et seulement si : $\forall x \in \Omega : f(x^*) \leq f(x)$ tel que :

- ✓ x^* : Optimum global
- ✓ f : Fonction objective
- ✓ Ω : Région faisable ($\Omega \in s$)
- ✓ s : Espace de recherche global

Le minimum global est illustré par le point M3 dans la figure 1.2

1.5.2.2 Minimum local

Un point x^* est un minimum local de la fonction f si et seulement si :

$$f(x^*) < f(x), \forall x \in V(x^*) \text{ et } x^* \neq x \quad (1.2)$$

D'où $V(x^*)$ définit un voisinage de x^* . Deux minimums locaux sont illustrés dans la figure 1.3 sont les points M1 et M2

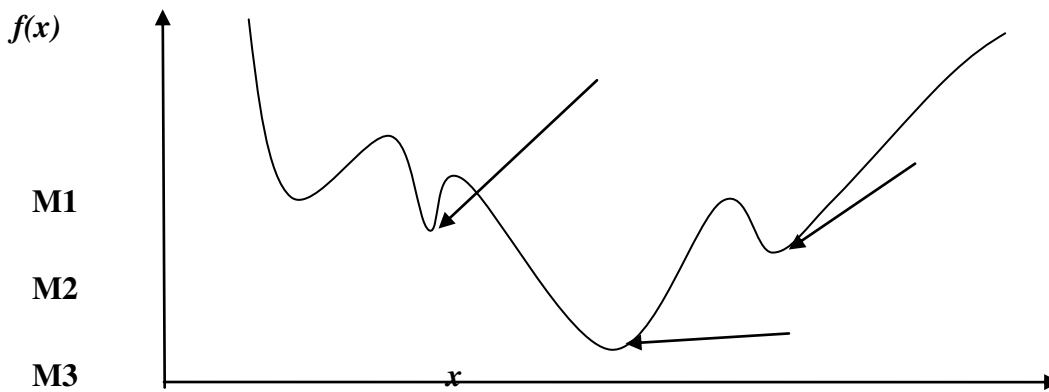


Figure 1.3 Illustration des différents minima d'une fonction mono-objective

1.5.3 Formulation du problème de l'optimisation multi objectif

Un problème d'optimisation multi-objectif peut se définir comme suit [NAI 15]:

Minimiser : $y = f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T$ est le transposé de la matrice (1.3)

Chercher le vecteur $x^* = [x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*]^T$ qui satisfait les conditions suivantes :

$$g_i(x) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

$$h_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, p$$

$$\text{Tel que : } x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T \in \Omega.$$

D'où,

- ✓ y représente le vecteur des fonctions objectives ;
- ✓ g_i représente les contraintes d'égalité
- ✓ h_i représente les contraintes d'inégalité
- ✓ x représente le vecteur des variables de décision dans l'espace de recherche Ω .

L'espace de recherche occupé par les fonctions objectives appelé l'espace des objectifs. Le sous-espace des fonctions objectives qui satisfait les contraintes s'appelle l'espace de recherche réalisable.

La solution utopique de y c'est la solution optimale pour tous les objectifs :

$$x_0^* \in \Omega : \forall x \in \Omega f_i(x_0^*) \leq f_i(x). \text{ pour } i \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$$

Dans le cas où $n = 1$, le problème d'optimisation multi objectif est réduit à un problème d'optimisation mono-objectif. Dans ce cas, la solution utopique est simplement l'optimum global. Dans le cas général où $n > 1$, la solution utopique n'existe pas puisque les fonctions objectives

sont généralement contradictoires. Dans ce cas, il existe un ensemble de solutions nommées les solutions non dominées (pour lesquels une fonction ne peut pas être améliorée sans dégrader au moins une autre équation) qui représentent le compromis entre les fonctions objectives.

1.5.4 Optimisation de l'écoulement de puissance

L'optimisation de l'écoulement de puissance connue par OPF (optimization of power flow) a été discutée la première fois par Carpentier en 1962. Dans les trois dernières décennies, le problème d'OPF a suscité beaucoup d'attention, en raison de ses capacités à résoudre pour la solution optimale qui tient compte de la sécurité du système et surtout les grandes performances de calculateurs numériques. [NAI 15]

L'optimisation de l'écoulement de puissance consiste à répartir les puissances actives et réactives demandées entre les différentes centrales interconnectées dans un réseau électrique pour optimiser une certaine fonction objective. Cette distribution doit évidemment respecter les limites de production des centrales et les capacités de transport des lignes électriques et les transformateurs et autres contraintes relatives au problème traité

Actuellement, pour toute entreprise électrique, l'OPF est devenu un outil indispensable. En exploitation, un OPF détermine périodiquement les valeurs optimales des variables électriques, en considérant toutes les contraintes et les limites. En se basant sur ces valeurs optimales, les opérateurs réalisent les manœuvres nécessaires pour obtenir l'exploitation optimale du système, en suivant les variations de la demande. En planification, l'OPF est utilisé pour planifier les changements pourront se produire sur le réseau en dehors de l'état optimal du système [NAI 15].

1.5.5 Formulation du problème de l'OPF

En effet, le problème de la répartition optimale des puissances est un problème d'optimisation dont l'objectif est de minimiser le coût total de la production de la puissance d'un réseau électrique. Si on prend en considération seulement la fonction objective, on parle alors d'une optimisation sans contraintes. Mais si on prend en considération les équations de l'écoulement de puissance, on est donc devant un problème d'optimisation avec contraintes d'égalités. Si on prend de plus les limites min. et max. des puissances générées par les alternateurs, la surcharge des lignes de transports et les niveaux de tensions admissibles pour les jeux de barres de charges, on est alors devant un problème d'optimisation avec contraintes d'égalités et d'inégalités.

Le problème de l'écoulement de puissance optimal est donné sous une forme standard d'optimisation avec contraintes d'égalités et d'inégalités comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min. } F(x) \text{ (fonction objective)} \\ \text{Sous} \\ g_i(x) = 0, i = 1, 2, \dots, m \text{ (contraintes d'égalité)} \\ \text{et} \\ h_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, p \text{ (contraintes d'inégalité)} \end{array} \right. \quad (1.4)$$

1.5.5.1 Fonctions objectives

a-Fonction coût

Elle est connue également par le dispatching économique, cette fonction reflète le besoin de minimiser le coût total de la production des puissances actives. On suppose que le coût individuel de chaque centre de production dépende uniquement de la génération de la puissance active [SAS 69].

$$F = \sum_{i=1}^{n_g} f_i = \sum_{i=1}^{n_g} a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (1.5)$$

Où : n_g : est le nombre des générateurs et : P_{Gi} est la puissance active générée au JB i .

a_i , b_i et c_i sont les coefficients de coût du générateur classique i .

b- Fonction émission

La production de l'électricité à partir des centrales classiques est à l'origine de combustion où la combinaison de l'oxygène dans l'air et le carbone formant le dioxyde de carbone (CO_2) et produisant de la chaleur est un processus complexe où des concentrations élevées de produits indésirables peuvent se former. Le monoxyde de carbone (CO), par exemple, est le résultat d'un mauvais mélange de combustible et de l'air ou trop peu d'air. Autres produits indésirables, tels que les oxydes d'azote (NO, NO_2), se forment en quantités excessives lorsque la température de la flamme du brûleur est trop élevée. Si un carburant contenant du soufre, du dioxyde de soufre (SO_2) de gaz est formé.

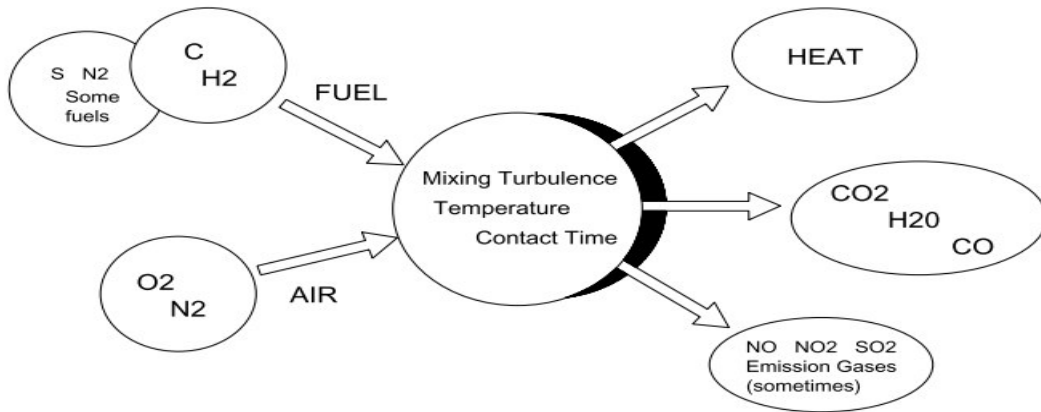


Figure 1.4 Diagramme de la Combustion

Ainsi d'après la figure 1.4 toute combustion est accompagnée d'une émission de gaz toxiques.

Cette fonction émission sert à calculer la quantité du gaz toxique émis par les différents unités de production électrique composant le réseau électrique, elle est principalement en fonction des puissances générées à partir de ces unités [YAL 07]:

$$\text{Minimisation de: } F(P_{G_i}) = \sum_{i=1}^{n_g} 10^{-2} (\alpha_i + \beta_i P_{G_i} + \gamma_i P_{G_i}^2) + \zeta_i \exp(\lambda_i P_{G_i}) \quad (1.6)$$

Où n_g : est le nombre des générateurs et P_{G_i} : est la puissance active générée au JB i .

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \lambda_i$: Les coefficients des puissances générées pour le générateur i .

1.5.5.2 Contraintes d'égalité

Tout en minimisant la fonction objective, il est nécessaire de s'assurer que la puissance générée satisfait toujours les demandes de charge (p_d) plus des pertes dans les lignes de transmission.

Habituellement les équations de l'écoulement de puissance sont employées comme contraintes d'égalité:

➤ Les équations de l'écoulement de puissance du réseau électrique.

$$g(V, \Phi) = 0 \quad (1.7)$$

$$\text{Où : } g(V, \Phi) = \begin{cases} P_i(V, \Phi) - p_i^{des} \\ Q_i(V, \Phi) - Q_i^{des} \\ p_m(V, \Phi) - p_m^{des} \end{cases} \quad (1.8)$$

Avec :

P_i et Q_i : sont respectivement les puissances active et réactive calculées pour les JB (PQ).

P_i^{des} et Q_i^{des} : sont respectivement les puissances active et réactive désirées pour les JB (PQ).

P_m et P_m^{des} : sont respectivement les puissances active calculé et désirées pour les JB (PV).

V et θ : sont respectivement l'argument et l'angle de la tension pour les différents JB.

1.5.5.3 Contraintes d'inégalité

Les contraintes d'inégalité de l'OPF reflètent les limites sur le dispositif physique dans les systèmes d'alimentation aussi bien que les limites créées pour assurer la sécurité du système. Le plus habituel les types de contraintes d'inégalité sont des limites supérieures de tension des jeux de barres de générations et les jeux de barres de charge, aussi les limites minimal de tension des jeux de barres pour quelques générateurs, les limites de chargement maximum de ligne et les limites de appareils et les outils de réglage. Les contraintes d'inégalité de système sont données comme suit :

- Les contraintes d'inégalité de la puissance réactive générée Q_{g_i} à chaque JB PV

$$Q_{g_i}^{min} \leq Q_{g_i} \leq Q_{g_i}^{max} \quad (1.9)$$

Où : $Q_{g_i}^{min}$ et $Q_{g_i}^{max}$ sont respectivement le minimum et la maximum de la puissance réactive au niveau du JB (PV_i).

- Les contraintes d'inégalité de l'amplitude V pour chaque JB (PQ).

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (1.10)$$

Où : V_i^{min} et V_i^{max} sont respectivement le minimum et le maximum de l'amplitude de la tension du jeu de barre i.

- Les contraintes d'inégalité de l'angle de phase Φ_i de la tension de tous les JB i.

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i \leq \theta_i^{max} \quad (1.11)$$

Où : θ_i^{min} et θ_i^{max} sont respectivement le minimum et le maximum de l'angle θ au JB i.

- Les limites des puissances transitées S(MVA) :

$$S_{ij} \leq S_{ij}^{max} \quad (1.12)$$

Où : S_{ij}^{max} est le maximum de la puissance apparente « S » transitée dans la ligne reliant JB i au JB j.

1.5.6 Méthodes de résolution de problèmes d'optimisation

En général, le problème d'OPF est un grand problème non-linéaire et fortement contraint de dimension d'optimisation. La nature des variables, des domaines de définition et des critères à optimiser va influencer le choix de la méthode d'optimisation à utiliser. Il y a deux grandes familles de méthodes d'optimisation : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques.

1.5.6.1 Méthodes déterministes

Les méthodes déterministes se caractérisent par une exploration systématique de l'espace de recherche. Il existe de nombreuses méthodes d'optimisation déterministes. Les méthodes locales qui assurent la convergence vers l'optimum de la fonction le plus proche de la solution courante en explorant son voisinage et les méthodes globales qui s'attachent à faire converger la solution vers l'optimum global de la fonction.

Historiquement, les méthodes de gradient sont les plus anciennes. Elles permettent de résoudre des problèmes non linéaires et sont basées sur une hypothèse forte : la connaissance de la dérivée de la fonction objectif en chacun des points de l'espace plusieurs méthodes similaires sont utilisées comme la méthode de Newton, point intérieur, Nelder Mead ou la méthode du simplexe... etc.

1.5.6.2 Méthodes stochastiques

Les méthodes stochastiques sont caractérisées par : un processus de création aléatoire ou pseudo-aléatoire des points dans l'espace d'état, une heuristique qui permet de guider la convergence de l'algorithme.

Ces méthodes sont utilisées dans des problèmes où on ne connaît pas d'algorithme de résolution en temps polynomial et pour lesquels on espère trouver une solution approchée de l'optimum global.

Dans la pratique, les méthodes stochastiques qui connaissent le plus de succès sont : la méthode Monte Carlo, le recuit simulé, les algorithmes évolutionnaires, le (Branch and Bound) stochastique et la méthode Tabou. Leurs atouts principaux sont les suivants :

- ✓ Facilité d'implantation
- ✓ Flexibilité par rapport aux contraintes des problèmes
- ✓ Qualité élevée des solutions

Les différentes méthodes stochastiques sont résumées dans la figure 1.5.

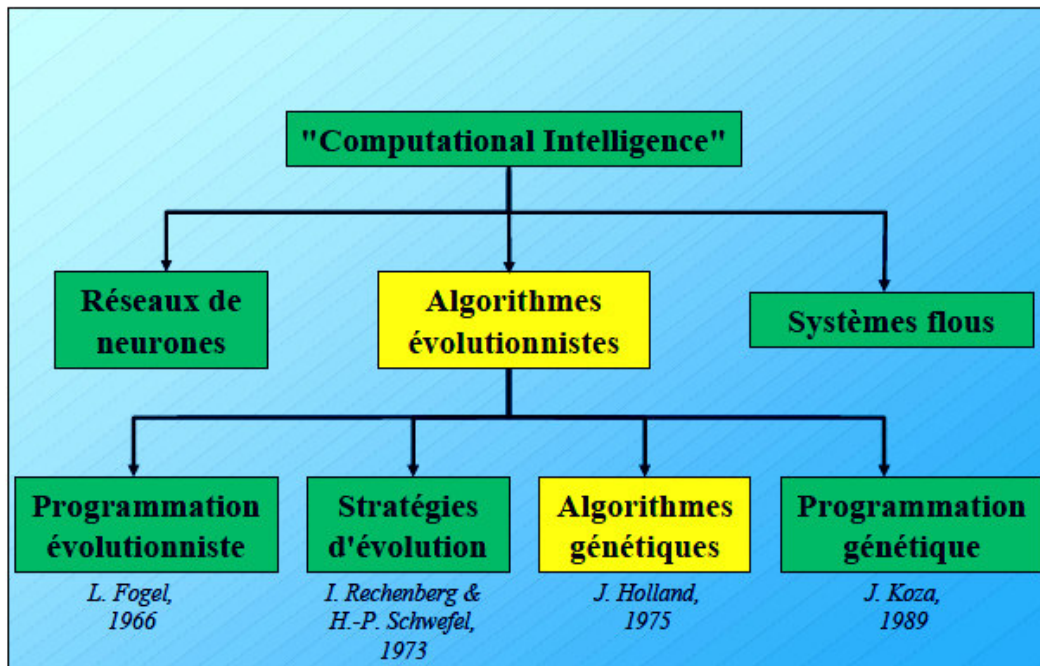


Figure 1.5 Schéma illustrant les différentes méthodes stochastiques

1.5.6.3- Algorithmes évolutionnaires

Les algorithmes évolutionnaires sont inspirés des concepts issus du Lamarckisme, Darwinisme et du mutationnisme. Les algorithmes évolutionnaires se caractérisent par :

- Une représentation spécifique des solutions potentielles du problème.
- Un ensemble d'individus formant une population permettant de mémoriser les résultats à chaque étape du processus de recherche.
- Un processus de création aléatoire d'un individu. Cette caractéristique offre une capacité exploratoire importante à la méthode.
- Un ensemble d'opérateurs de modification permettant de créer de nouvelles solutions à partir des informations mémorisées. Ces opérateurs offrent une capacité de recherche locale à la méthode.
- Une heuristique de notation qui représente la sélection effectuée par l'environnement.
- Une heuristique de sélection.
- Un critère d'arrêt de l'algorithme.

On distingue plusieurs types d'algorithmes évolutionnaires :

- Les algorithmes génétiques qui sont inspirés des mécanismes de l'évolution naturelle.

- La programmation génétique est une extension des algorithmes génétiques dans laquelle les individus sont des programmes. Le génotype d'un individu est constitué d'un alphabet et se présente sous forme arborescente.

Avantages

- Ces méthodes sont applicables dans la plupart des problèmes d'optimisation multimodaux, non continus, contraints, bruités, multi objectifs, dynamiques, etc.
- Elles sont flexibles par rapport aux nouvelles contraintes et nouveaux critères à prendre en compte.
- Les résultats sont en général exploitables et interprétables par le décideur.
- Elles n'exigent pas d'hypothèse par rapport à l'espace d'état (continuité, dérivabilité)
- Elles n'exigent pas la présence de modèle mathématique du problème à optimiser
- Pas de risque de tomber sur un optimum local.
- Ces différents avantages sont illustrés dans la figure 1.6 grâce à l'approche stochastique.

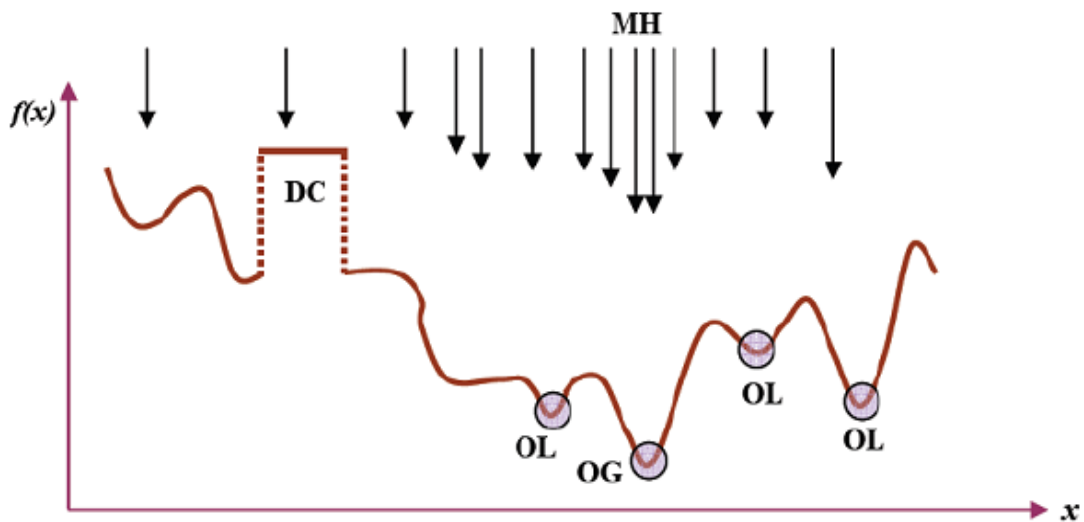


Figure 1.6 Représentation simplifiée d'une approche stochastique

Inconvénients

- Elles n'offrent aucune garantie de trouver l'optimum en un temps fini. Mais cela est vrai pour toutes les méthodes d'optimisation globales.
- Leur base théorique est insuffisante.
- Le réglage des paramètres est largement inspiré de l'essai/erreur sauf pour les stratégies d'évolution qui sont auto-adaptatives.

Les algorithmes évolutionnaires se caractérisent par :

- Une représentation spécifique des solutions potentielles du problème.
- Un ensemble d'individus formant une population permettant de mémoriser les résultats à chaque étape du processus de recherche.
- Un processus de création aléatoire d'un individu. Cette caractéristique offre une capacité exploratoire importante à la méthode.
- Un ensemble d'opérateurs de modification permettant de créer de nouvelles solutions à partir des informations mémorisées. Ces opérateurs offrent une capacité de recherche locale à la méthode.
- Une heuristique de notation qui représente la sélection effectuée par l'environnement.
- Une heuristique de sélection.
- Un critère d'arrêt de l'algorithme.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre des notions sur le dispatching économique et environnemental ainsi que leur formulation c'est-à-dire la fonction objective et les contraintes. Comme on a passé en revue les méthodes d'optimisation classiques et stochastiques qui utilisent l'intelligence artificielle pour résoudre les problèmes d'optimisation. .

Dans le chapitre suivant, on va étudier l'une des techniques d'intelligence artificielle ; celle des algorithmes génétiques, qui sera utilisée dans le chapitre 04 comme méthode novatrice pour le calcul du dispatching économique.

Chapitre II

*Les algorithmes
génétiques*

Introduction

Les algorithmes d'optimisation peuvent être classés en algorithmes d'optimisation locale et algorithmes d'optimisation globale. Alors que les algorithmes de la première classe sont piégés par le premier minimum qu'ils rencontrent ou sont handicapés par la taille de l'espace de recherche, les algorithmes de la seconde classe ne présentent pas ces inconvénients et permettent de trouver une solution proche de l'optimum global.

Les algorithmes génétiques reposent sur l'analogie entre la théorie de l'évolution naturelle de DARWIN et l'optimisation. Selon la théorie de DARWIN, les individus d'une population les mieux adaptés à leurs environnements ont une plus grande probabilité de survivre et de se reproduire, en donnant des descendants encore mieux adaptés, comme dans les mécanismes naturels de reproduction.

Historique

Les algorithmes génétiques, initiés dans les années 1970 par John Holland, sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et des mécanismes d'évolution de la nature : croisement, mutation, sélection. [PHI 04] Puis développés par d'autres chercheurs tels que : Jong 75, Goldberg 89 et Michalewicz 94. La parution en 1989 de l'ouvrage de référence écrit par D.E Goldberg [GOL 89], qui décrit l'utilisation de ces algorithmes dans le cadre de résolution de problèmes concrets, a permis de mieux faire connaître ces derniers dans la communauté scientifique et a marqué le début d'un nouvel intérêt pour cette technique d'optimisation, notamment après la parution de puissants calculateurs dans les années 90.

2.1 Principe

Les algorithmes génétiques (AG) sont des méthodes utilisées dans les problèmes d'optimisation. Les AG tirent leur nom de l'évolution biologique des êtres vivants dans le monde réel. Ces algorithmes cherchent à simuler le processus de la sélection naturelle dans un environnement défavorable en s'inspirant de la théorie de l'évolution proposée par C. Darwin. Dans un environnement, « les individus » les mieux adaptés tendent à vivre assez longtemps pour se reproduire alors que les plus faibles ont tendance à disparaître (the survival of the fittest); [MIC99];[TOM 99].

Par analogie avec l'évolution naturelle, les AG font évoluer un ensemble de solutions candidates, appelé une « population d'individus ». Un « individu » n'est autre qu'une solution possible du problème à résoudre. Chaque individu de cette population se voit attribuer une fonction appelée fonction d'adaptation (fitness) qui permet de mesurer sa qualité ou son poids; cette fonction

d'adaptation peut représenter la fonction objective à optimiser. Ensuite, les meilleurs individus de cette population sont sélectionnés, subissent des croisements et des mutations et une nouvelle population de solutions est produite pour la génération suivante.

Ce processus se poursuit, génération après génération, jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint, comme par exemple le nombre maximal de générations.

Ce chapitre est organisé en trois sections. Premièrement, le principe de fonctionnement d'un AG, ainsi que les principaux éléments qui caractérisent un AG standard, et ensuite une explication de l'outil GA à l'optimisation multi objective et la relation avec le système de l'écoulement de puissance.

2.2 Présentation

Les techniques de recherche et d'optimisation sont en général classées en trois catégories [COD02]: énumératives, déterministes et stochastiques. Les AG font partie de la troisième catégorie et quatre caractéristiques les distinguent des autres techniques d'optimisation [GOL 89]:

- Ils utilisent un codage des paramètres et non les paramètres eux-mêmes.
- Ils travaillent sur une population d'individus (ou de solutions).
- Ils n'utilisent que les valeurs de la fonction à optimiser, pas sa dérivée, ou une autre connaissance auxiliaire.
- Ils utilisent des règles de transition probabilistes et non déterministes.

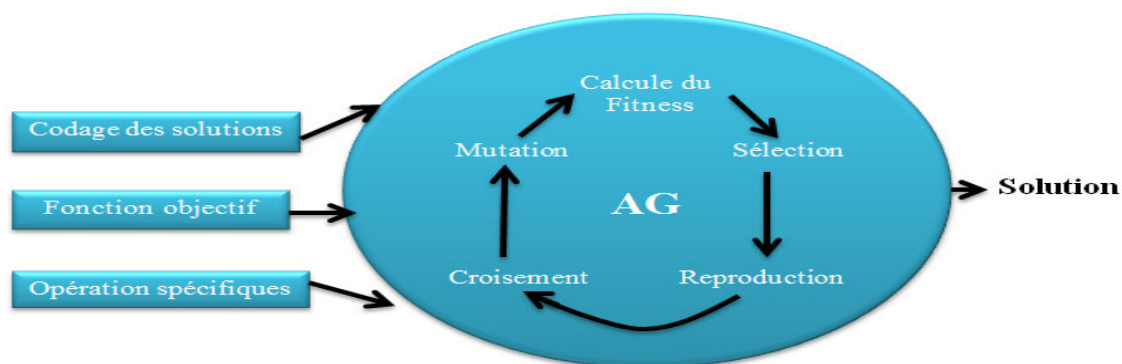


Figure 2.1 Vue d'ensemble d'un algorithme génétique

2.2.1 Principe de base d'un AG standard

Un AG standard nécessite en premier le codage de l'ensemble des paramètres du problème d'optimisation en une chaîne de longueur finie. Le principe d'un AG est simple, il s'agit de simuler l'évolution d'une population d'individus jusqu'à un critère d'arrêt. On commence par générer une

population initiale d'individus(solutions) de façon aléatoire. Puis, à chaque génération, des individus sont sélectionnés, cette sélection est effectuée à partir d'une fonction objective appelée fonction d'adaptation. Puis, les opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués et une nouvelle population est créée. Ce processus est itéré jusqu'à un critère d'arrêt. Le critère le plus couramment utilisé est le nombre maximal de générations que l'on désire effectuer. La figure 2.2 présente le principe de l'AG standard.

L'AG débute par la génération d'une population initiale et l'évaluation de la fonction d'adaptation de tous les individus qui composent cette première population. Puis, des individus sont sélectionnés aléatoirement pour la reproduction selon le principe de la survie du plus adapté. Ensuite, des individus « enfants » (ou les descendants) sont générés en appliquant les deux opérateurs génétiques suivants : le croisement et la mutation. Ces enfants sont placés dans une nouvelle population $P(t)$ et vont se substituer, en tout ou en partie, à la population de la génération précédente. De nouvelles populations d'individus vont ensuite se succéder, d'une génération (t) à la génération ($t + 1$), chaque génération représentant une itération jusqu'à l'atteinte du critère d'arrêt. L'AG présenté ci-dessus est dit générationnel car tous les individus enfants générés sont placés dans une population et vont remplacer entièrement la population des individus parents.

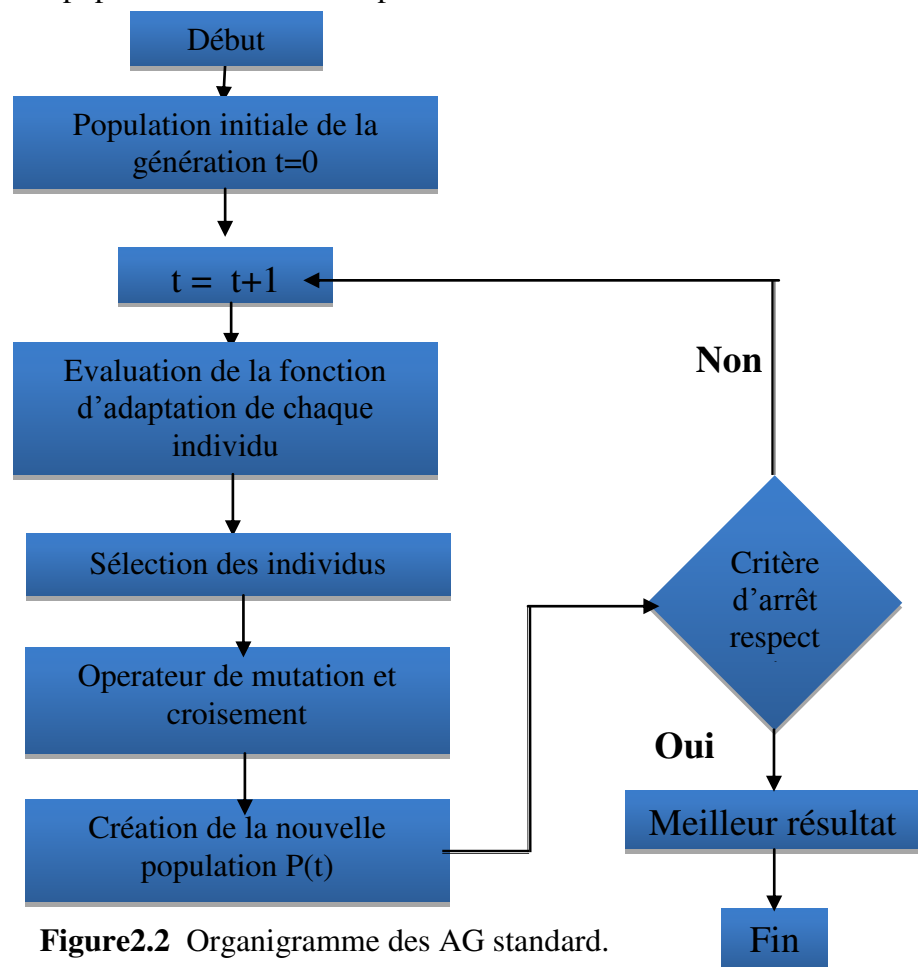


Figure 2.2 Organigramme des AG standard.

2.2.2 Les principales opérations d'un AG

2.2.2.1 Sélection

La sélection a pour objectif d'identifier les individus qui doivent se reproduire. Cet opérateur ne crée pas de nouveaux individus mais identifie les individus sur la base de leur fonction d'adaptation, les individus les mieux adaptés sont sélectionnés alors que les moins bien adaptés sont écartés [DEB99]. La sélection doit favoriser les meilleurs éléments selon le critère à optimiser (minimiser ou maximiser). Ceci permet de donner aux individus dont la valeur est plus grande une probabilité plus élevée de contribuer à la génération suivante (figure 2.3).

Il existe plusieurs méthodes de sélection, les plus connues étant la « roue de la fortune » et la « sélection par tournoi » :

- La « roue de la fortune » est la plus ancienne, où chaque individu, de la population de taille maximale J_{max} , occupe une section de la roue proportionnellement à sa fonction d'adaptation $Fitness(j)$, la probabilité de sélection d'un individu (j) s'écrit :

$$Prob(j) = \frac{Fitness(j)}{\sum_{j=1}^{J_{max}} Fitness(j)} \dots\dots\dots (2.1)$$

À chaque fois qu'un individu doit être sélectionné, un tirage à la loterie s'effectue et propose un candidat, les individus possédant une plus grande fonction d'adaptation ayant plus de chance d'être sélectionnés. à chaque fois qu'il faut sélectionner un individu, la « sélection par tournoi » consiste à tirer aléatoirement (k) individus de la population, sans tenir compte de la valeur de leur fonction d'adaptation, et de choisir le meilleur individu parmi les k individus. Le nombre d'individus sélectionnés a une influence sur la pression de sélection, lorsque $k = 2$, la sélection est dite par « tournoi binaire ».

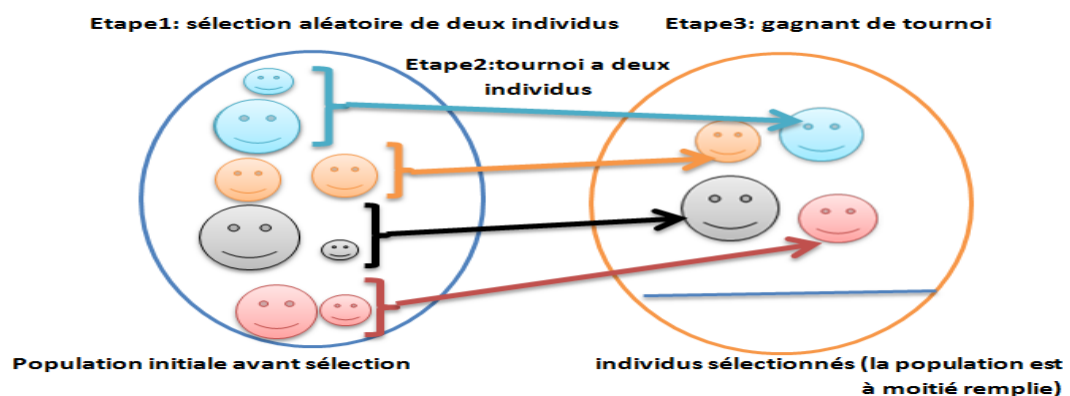


Figure 2.3 Représentation d'une sélection par tournoi d'individus pour un critère de maximisation (chaque individu représente une solution possible)

2.2.2.2 Croisement

Le croisement permet de créer de nouvelles chaînes en échangeant de l'information entre deux chaînes (figure 2.4). Le croisement s'effectue en deux étapes. D'abord les nouveaux éléments produits par la reproduction sont appariés, ensuite chaque paire de chaînes subit un croisement comme suit : un entier k représentant une position sur la chaîne est choisi aléatoirement entre 1 et la longueur de chaîne (ℓ) moins un ($\ell - 1$). Deux nouvelles chaînes sont créées en échangeant tous les caractères compris entre les positions $k + 1$ et ℓ inclusivement. L'exemple suivant (figure 3.4) montre deux chaînes (A_1 et A_2) de longueur $\ell = 5$ appartenant à la population initiale. Les deux nouvelles chaînes (A_3 et A_4) appartenant à la nouvelle population sont obtenues par croisement à la position $k = 4$:

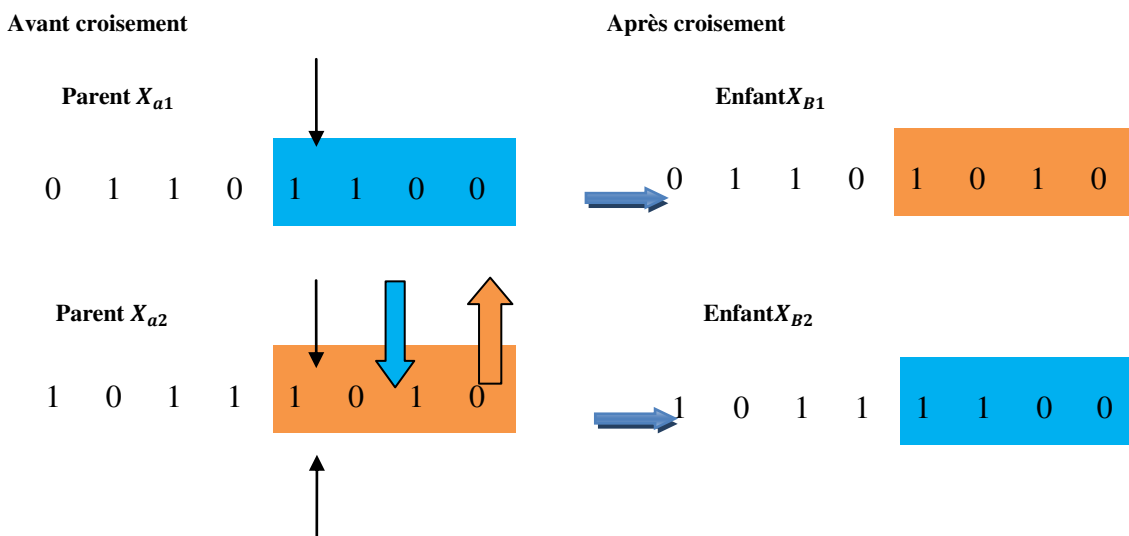


Figure 2.4 Représentation d'un croisement en un point de deux chaînes.

2.2.2.3 Mutation

La mutation est exécutée seulement sur une seule chaîne. Elle représente la modification aléatoire et occasionnelle de faible probabilité de la valeur d'un caractère de la chaîne, pour un codage binaire cela revient à changer un 1 en 0 et vice versa (figure 3.5). Cet opérateur introduit de la diversité dans le processus de recherche des solutions et peut aider l'AG à ne pas stagner dans un optimum local.

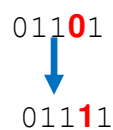


Figure 2.5 Représentation d'une mutation de bits dans une chaîne

2.2.2.4 Codage

Le codage utilisé par un AG est représenté sous forme d'une chaîne de bits qui contient toute l'information nécessaire pour représenter un point de l'espace de recherche. Le codage binaire est le code le plus utilisé [GOL 89], l'inconvénient majeur du code binaire étant que deux points proches dans l'espace des variables (voir la colonne 1 du Tableau 3.1) ne sont pas nécessairement codés par deux chaînes de bits voisines (colonne 2 du Tableau 3.1). On remédie en général à ce problème en utilisant le codage de Gray qui conserve une distance de Hamming de « 1 » entre deux chaînes (colonne 3 du Tableau 2.1). La distance de Hamming entre deux chaînes de bits est le nombre de bits qui diffère de l'une à l'autre. Pour les deux chaînes suivantes: 111 et 100, la distance est de 2.

Le Tableau 3.1 montre un exemple du code binaire et le code Gray pour des variables entières allant de 0 et 7. On voit que la distance de Hamming est de 1 pour chaque entier dans le code Gray, alors que pour les nombres binaires, pour passer de 3 à 4, la distance de Hamming est de 3.

Variables entières	Code binaire	Code Gray
0	000	000
1	001	001
2	010	011
3	011	010
4	100	110
5	101	111
6	110	101
7	111	100

Tableau2.1 Code de Gray et code binaire pour une chaîne à trois bits

2.2.3 Paramètres d'un AG

Pour appliquer un AG à un problème réel, on doit posséder les éléments suivants :

- Un codage des éléments appartenant à la population, le codage des solutions du problème à résoudre doit être choisi avec soin;
- Une fonction d'évaluation ou d'adéquation de l'individu qui mesure la qualité de l'individu;
- Un processus d'évolution des générations;
- Des opérateurs pour modifier les individus d'une population de la génération (t) à la génération ($t + 1$) comme le croisement et la mutation;
- Des paramètres de l'AG : les opérateurs précédents dépendent de plusieurs paramètres qui sont fixés à l'avance et dont dépend fortement la convergence de l'algorithme :

1. Taille de la population : c'est-à-dire le nombre d'individus dans la population. Si la taille est trop petite, l'AG peut ne pas converger, par contre si elle est trop grande, l'évaluation des individus peut être très longue;
2. Probabilité de croisement et de mutation. Les valeurs de ces probabilités peuvent varier d'une application à l'autre. Par exemple, dans l'étude des AG pour l'optimisation de cinq fonctions mathématiques, De Jong (1975) a suggéré de choisir une probabilité de croisement élevée, une probabilité de mutation faible (inversement proportionnelle à la taille de la population), et une population de taille modérée [GOL89]. La probabilité de mutation est en général très faible, inférieure à 0,1, une probabilité trop grande, peut modifier les meilleurs individus;
3. Critère d'arrêt : c'est-à-dire le nombre maximal de générations à effectuer.

2.2.4 Processus d'évolution des générations : générationnel, stationnaire et élitiste

Traditionnellement, les AG sont générationnels. Les individus de chaque génération sont testés et une nouvelle population en entier est générée, le nombre de descendants produits est donc égal au nombre d'individus parents.

Les deux populations ne se chevauchent pas [LAN 98]. La nouvelle population d'individus enfants est formée à chaque génération. Cependant, certains individus enfants peuvent être une copie conforme des parents qui n'ont pas été perturbés ni par un croisement ni par une mutation.

La stratégie de remplacement stationnaire (steady-state) diffère de l'AG générationnel. Dans cette approche, il y a seulement un ou deux individus qui sont générés à la fois [RYA 95]. Il peut y avoir différentes façons de sélectionner « l'individu victime » à supprimer de la population. Par exemple, on peut sélectionner un individu aléatoirement ou sélectionner celui qui a la plus petite fonction d'adaptation. Dans ce type d'AG, les nouveaux individus générés sont ajoutés à la population et peuvent immédiatement être sélectionnés comme parents de nouveaux individus [LAN].

Approche élitiste (élitiste model)

Les opérateurs de croisement et de mutation peuvent affecter le meilleur individu d'une génération. Le modèle élitiste a pour avantage d'écartier la possibilité de perdre cet individu. Ce modèle copie le meilleur individu de chaque génération dans la population de la génération suivante. Ce modèle peut accélérer la vitesse de domination exercée par ce super individu sur la population [RYA 95].

2.2.5 Opérateurs de croisement

Il existe d'autres opérateurs de croisement :

- 1) Croisement en deux points: on choisit au hasard deux points de croisement et on échange les parties de chaîne situées entre ces deux points (figure 2.6).

Avantcroisement en deux points après



Figure 2.6 Représentation d'un croisement en deux points.

- 2) Croisement uniforme : dans ce type de croisement, on utilise un masque de croisement (mask), qui consiste en un vecteur généré aléatoirement, de longueur identique aux chaînes parents, et composé de 0 et 1. Lorsque le bit du masque vaut 0, l'enfant hérite le bit du premier parent, sinon il hérite de celui du second parent. Le second enfant est le complémentaire du premier. Ce croisement peut être considéré comme une généralisation du croisement multipoint sans connaissance préalable du point de croisement (figure 2.7).

A1 001010 (Parent 1)

A2 011111 (Parent 2)

Masque 001101

A3 001111 (Enfant 1)

A4 011010 (Enfant 2)

Figure 2.7: Représentation d'un croisement uniforme

2.3 AG en îlots (ou avec dômes)

Au lieu d'utiliser une seule population, on peut trouver des AG qui utilisent des ensembles de petites sous-populations (appelées des dômes) qui évoluent séparément. Ce modèle est appelé modèle en îlots. Grâce à cette isolation, chaque îlot peut évoluer avec ses propres paramètres, dans des directions différentes, c'est-à-dire vers des solutions différentes. Dans ce type d'AG, on peut faire migrer un certain nombre d'individus d'une sous-population (j) à une sous-population voisine

$(j + 1)$. L'îlot qui évolue vers un optimum local ou qui a convergé prématurément peut être aidé par l'arrivée d'un ou de plusieurs individus migrants.

La figure 2.8 présente un exemple d'une population avec cinq deme, dans laquelle deux individus sont choisis aléatoirement pour migrer du deme (j) au deme $(j + 1)$. Les individus sélectionnés pour la migration peuvent rester dans leur îlot et seulement une copie est envoyée dans l'îlot voisin, ou bien ces individus sont envoyés directement dans l'îlot voisin.

D'après [RYA 95] la sélection des individus migrants peut se faire de deux façons.

Le premier est aléatoire, l'avantage de cette méthode est la plus grande variété des individus qui peut en résulter. La seconde méthode consiste à sélectionner les individus en fonction de leurs fonctions d'adaptation et choisir les plus performants de chaque îlot pour les copier dans les autres îlots, ce qui peut engendrer une évolution plus directe que la première méthode. [CAN 00] a testé plusieurs autres configurations, par exemple : les meilleurs migrants remplacent les moins bons, les migrants sélectionnés aléatoirement remplacent les moins bons, les meilleurs migrants remplacent des migrants sélectionnés aléatoirement. Le choix des individus migrants d'un deme à l'autre et des individus remplacés dans chaque deme peut influencer la pression de sélection. Les configurations qui sélectionnent les individus migrants ou remplacés en fonction de leur fonction d'adaptation ont tendance à accélérer la convergence.

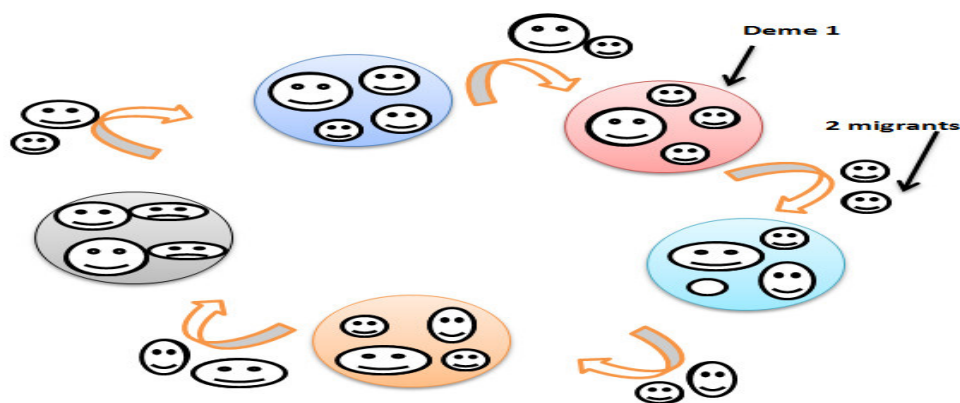


Figure 2.8 Représentation d'un AG en îlots

L'avantage du modèle en îlots est que la recherche de la meilleure solution se fait en parallèle, dans différents espaces de recherche, ce qui permet d'avoir plusieurs solutions qui peuvent être très utiles surtout dans le cas des fonctions multimodales. Le second avantage est que, lorsque l'on envoie des individus d'un îlot à l'autre, on peut éviter une convergence prématurée de l'AG dans chaque îlot et le fait de copier des individus d'un îlot à l'autre plutôt que de les envoyer à l'îlot voisin ne cause

aucune perte dans la qualité des individus, même lorsque ces individus devront s'apparier avec d'autres individus moins bons.

L'AG en îlots nécessite de préciser, en plus des paramètres de l'AG standard cités précédemment (section 2.1.3), les paramètres suivants : la taille des sous-populations (ou nombre de dèmes), la fréquence de migration des individus (exprimée en nombre de générations) et le nombre d'individus qui migrent à chaque fois (peut être exprimé en % de la taille du dème).

L'algorithme pour le modèle en îlots est schématisé à la figure 2.9. Dans chaque dème (sous-population), un AG est exécuté séquentiellement. Les dèmes peuvent s'échanger de l'information de temps à autre en permettant à certains individus de migrer d'une sous-population à l'autre selon certaines topologies.

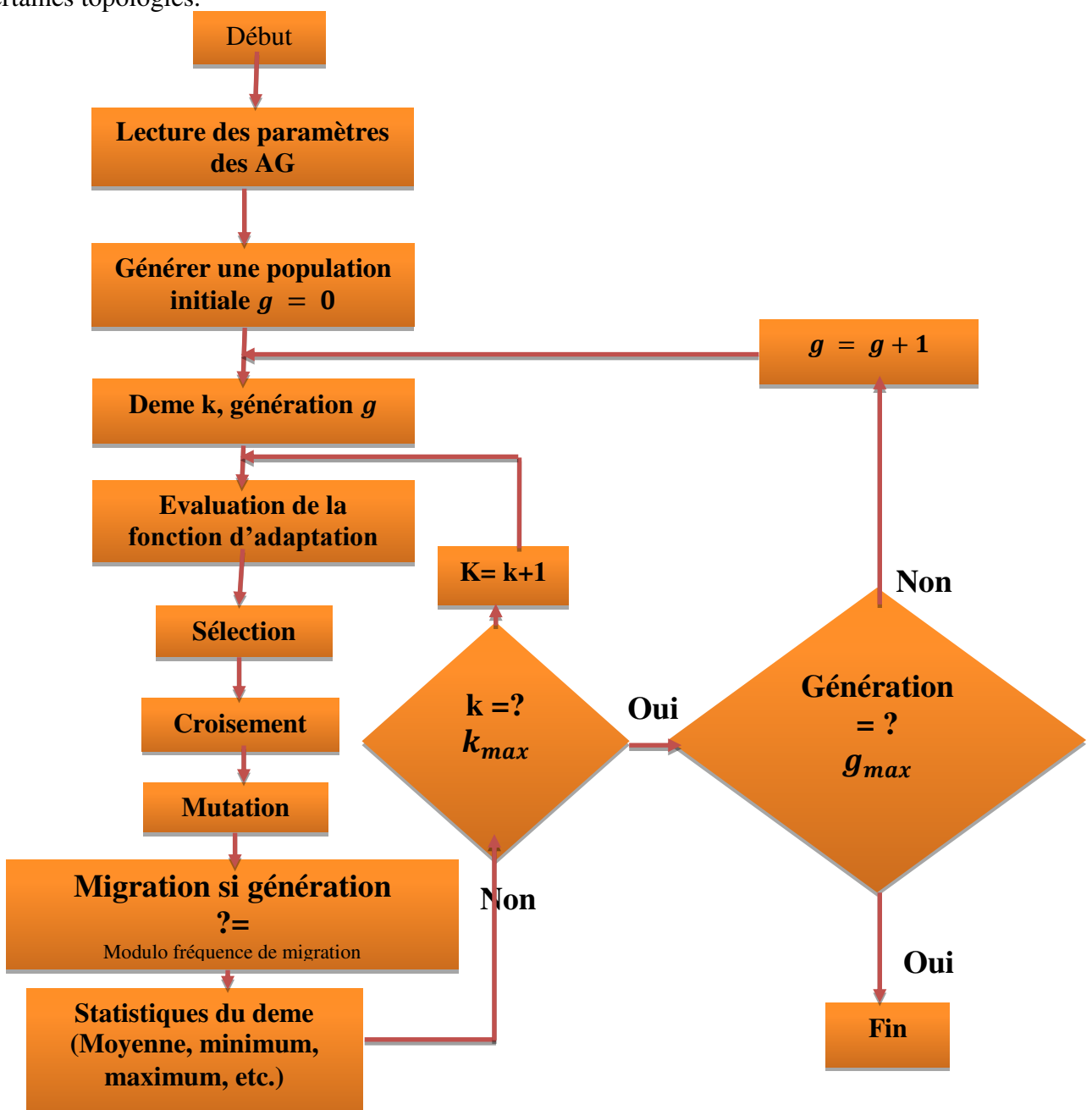


Figure2.9 Processus d'évolution dans un modèle d'AG en îlots, générationnel

2.4 AG pour l'optimisation multi objective

Dans la plupart des AG d'optimisation multi objective développée, il s'agira de satisfaire les deux points suivants [DEB 99]:

1. trouver des solutions aussi proches que possible des vraies solutions Pareto-optimales, c'est-à-dire converger le plus possible vers le front de Pareto,
2. trouver un ensemble de solutions très variées, tout le long du front.

Le tout premier algorithme évolutionnaire d'optimisation multiobjectif s'appelle VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithm, AGEV : Algorithme Génétique à Évaluation Vectorielle) et a été présenté par Schaeffer en 1985 [CAN 00]. Cet algorithme considère une population de N individus. Ces individus sont répartis en k sous-populations, chaque valeur de k représentant un objectif à optimiser. À chaque génération, un nombre de sous-populations est généré par sélection en fonction de l'objectif k . Ensuite, ces sous-populations sont regroupées pour former une nouvelle population de N individus et les opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués.

L'avantage de cet algorithme est qu'il est facile à implanter mais son inconvénient majeur est qu'il a tendance à générer des solutions qui excellent dans un seul objectif, sans tenir compte des autres objectifs. Toutes les solutions de moyenne performance, qui peuvent être de très bons compromis, risquent de disparaître avec ce type de sélection.

Depuis VEGA, un nombre considérable d'AG d'optimisation multiobjectifs ont été proposés : NPGA [HOR 94]; NPGA 2 [ERI 01]; NSGA [SRI 94]; NSGA-II [DEB 02], les algorithmes micro-GA qui réfèrent à des algorithmes avec de petites populations avec réinitialisation.

Tous les algorithmes présentés dans cette section sont basés sur une approche Pareto, c'est-à-dire que le principe de dominance est utilisé dans le processus de sélection. Le NPGA (Niche Pareto Genetic Algorithm) et le NPGA 2, une version améliorée du NPGA, sont présentés. Ensuite on expose le principe du NSGA-II (Non Dominated Sorting Genetic Algorithm-II) qui utilise une approche élitiste et qui est considéré comme plus efficace que le NSGA.

2.5 Ecoulement de puissance optimal par l'algorithme génétique

Les algorithmes évolutionnaires (EA) sont les systèmes informatisés de résolution des problèmes ce qui sont les modèles informatiques des processus évolutionnaires en tant qu'éléments principaux dans leur conception et exécution. L'algorithme génétique est le plus populaire et

extensivement utilisé de tous algorithmes évolutionnaires. Il transforme un ensemble (population) de différent mathématique objets (caractère habituellement fixe de longueur ou cordes binaires), chacun avec une forme physique associée valeur, dans une nouvelle population (prochaine génération) employant des opérations génétiques semblables aux opérations correspondantes de la génétique en nature.

2.5.1 Algorithme génétique dans l'optimisation

L'algorithme de base par lequel GA fonctionnent est raisonnablement bien établi. GA est inspiré par la théorie évolutionnaire expliquant l'origine de l'espèce. En nature, faible et des espèces incapables dans leur environnement sont confrontées à l'extinction par choix normal. Les forts ont

une plus grande occasion de passer leurs gènes vers de futures générations par l'intermédiaire de reproduction. En fin de compte, espèce portant la combinaison correcte dans leurs gènes devenez dominant dans leur population. Parfois, pendant le processus lent de l'évolution, les changements aléatoires peuvent se produire dans les gènes. Si ces changements fournissent des avantages additionnels dedans le défi pour la survie, nouvelle espèce évoluent de la vieille. Changements non réussis sont éliminés par choix normal. Ces algorithmes codent une solution potentielle à a le problème spécial sur un chromosome simple comme la structure de données et appliquent la recombinaison opérateurs à ces structures afin de préserver l'information critique.

Les algorithmes génétiques (GA) ont été reconnus pour approprié bien à l'optimisation multiobjective. Dans GA les individus multiples peuvent rechercher les solutions multiples en parallèle, avantageusement production d'une famille des solutions possibles au problème. La capacité de manipuler le complexe des problèmes impliquant des dispositifs tels que des discontinuités, multimodality, et disjoignent faisable les espaces, renforce l'efficacité potentielle de GA dedans multi - recherche objective et optimisation. Il existe différentes procédures de sélection dans GA selon la façon dont des valeurs de forme physique sont employées. Le choix, le rang, et le choix proportionnels de tournois sont la plupart des procédures de sélection populaires. Le procédé pour l'algorithme génétique est donné ci-dessous:

- Etape 1: Initialisation: Produisez aléatoirement de la population initiale de la taille N et placez $I = 0$.
- Etape 2: Tâche de Forme physique: évaluez la valeur « fitness » de chaque population basée sur la valeur de fonction objective.
- Etape 3: Si le critère d'arrêt est satisfait, terminez la recherche et montrez le résultat sinon, passez à l'étape 4.

- Etape 4: Croisement Pour produire la progéniture à l'aide du croisement, choisissez aléatoirement deux de la solution des parents de la population initiale et produisent alors employant deux progénitures comme opérateur de croisement.
- Etape 5: Mutation: Cet opérateur aléatoirement élit une solution de parent 'initiale de population et applique l'opérateur de mutation pour produire d'une progéniture simple.
- Etape 6: Choix: Choisissez les solutions de N à partir de la population produite et de la vieille population, basée sur leur forme physique. Placez la génération $i = i + 1$. Passez à l'étape 2.

Le schéma fonctionnel de l'algorithme génétique de base est montré ci-dessous .:

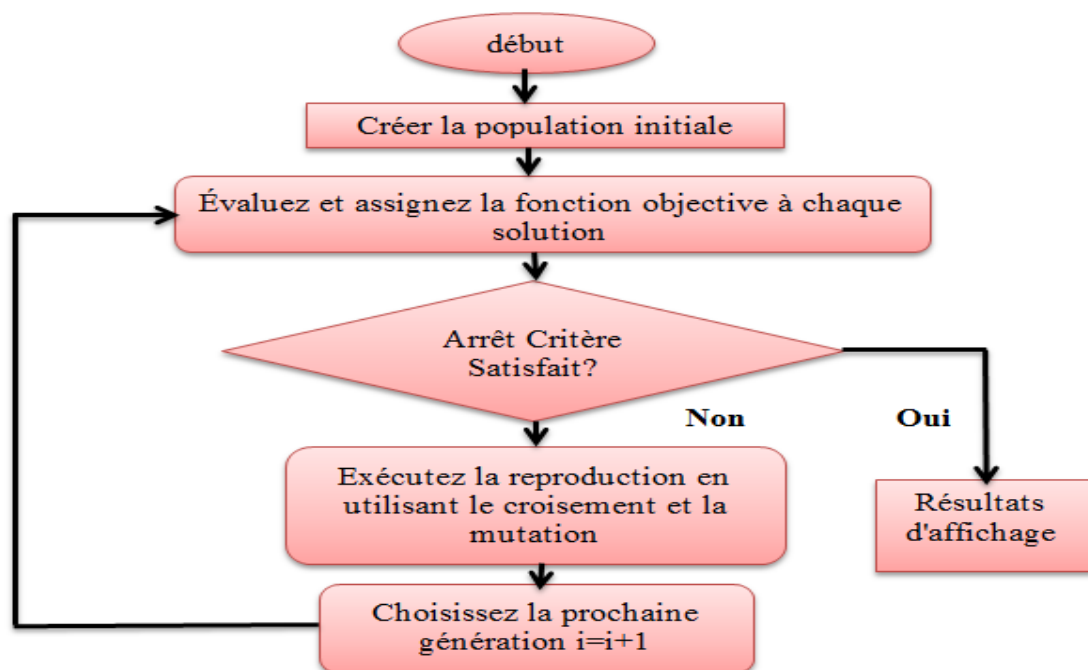


Figure2.10 Schéma fonctionnel d'algorithme génétique

Avantages de GA

Les avantages de GA sont donnés ci-dessous :

- Simple pour comprendre et mettre en application.
- Optimise avec des variables continues ou discrètes.
- N'exige pas la dérivation de la fonction objective.
- Recherche simultanément d'un prélèvement large de la surface de coût.
- Fonctionne avec un grand nombre de variables.
- Approprié bien aux ordinateurs parallèles.
- Optimise des variables avec des fonctions extrêmement complexes (elles peuvent sauter un minimum local).

- Fournit une liste de variables optimales, pas seulement une solution unique.
- Peut coder les variables de sorte que l'optimisation soit faite avec les variables codées.
- Travaille avec des données numériquement produites, des données expérimentales, ou analytique codés variables.
- Travaille avec des données numériquement produites, des données expérimentales, ou des fonctions analytiques.

Ces avantages sont des résultats intrigants et de produit d'étourdissement où optimisation traditionnelle les approches échouent malheureusement. En raison de divers avantages discutés ci-dessus, GA est employé pour un nombre de différents domaines d'application. Dans le système d'alimentation, le GA a été employé en plusieurs secteurs :

- ⇒ Réduction de perte à l'aide du filtre actif
- ⇒ Planification de restauration de système.
- ⇒ Contrôleurs
- ⇒ Expédition optimale de charge
- ⇒ Stabilité de tension.

Inconvénients de GA

Malgré son exécution réussie, GA présente quelques faiblesses menant à

- Un plus long temps de calcul.
- Moins de convergence garantie, en particulier en cas de fonction objective épistémique contenant des paramètres fortement corrélés.
- La convergence prématurée de GA est accompagnée d'une probabilité très élevée d'occlusion dans l'optimum local.
- GA tend à échouer avec les problèmes plus difficiles et a besoin de la bonne connaissance du problème.
- Aucune convergence garantie même au minimum local.

Conclusion

Les algorithmes génétiques sont des méthodes méta heuristiques d'optimisation globale basées sur des concepts de génétique et de sélection naturelle. Le composant principal des AG est le gène qui se compose d'une chaîne de caractères (souvent binaire). Les gènes s'enchaînent et forment les chromosomes. Ces derniers forment les individus dans l'espace de recherche. Ainsi, les AG travaillent sur une population d'individus, où chacun de ces derniers représente une solution possible

pour le problème donné. Dans chaque itération de l'AG, la performance de chaque individu de la population courante est calculée. Les opérateurs de génétiques, sélection, croisement et mutation, sont appliqués successivement pour créer une nouvelle population jusqu'à l'approche rigoureuse de la solution optimale.

Dans ce chapitre, nous avons présenté tout d'abord une vue générale sur les algorithmes génétiques, leurs paramètres et les principales opérations, ainsi quelques concepts concernant l'application des algorithmes génétiques sur l'optimisation multi objective basant sur le système de l'écoulement de puissance.

Chapitre III

*Intégration de l'énergie
éolienne dans le réseau
électrique*

Introduction

Les changements climatiques que connaît le monde aujourd'hui constituent un très grand défi auquel tous les pays doivent faire face. A ce propos, les scientifiques ont attiré l'attention sur les sources d'énergie renouvelable (énergie solaire, éolienne, géothermie et biomasse) qui représentent une réelle opportunité pour un futur propre et respectueux de l'environnement [MIR 05].

La production traditionnelle est basée sur des centrales thermiques ou nucléaires ainsi que sur des sources hydrauliques. Ce type de production d'électricité est souple d'utilisation (grâce à la disponibilité de l'énergie primaire) et répondent aux critères techniques permettant la sauvegarde du réseau tandis que les énergies renouvelables sont fortement dépendantes de la disponibilité de la source primaire et ne répondent pas ou peu aux critères de sauvegarde du réseau.

Dans ce chapitre, on décrit le système éolien. On montre ses éléments et son principe de fonctionnement, on présente les principaux types du système et leurs applications, leurs systèmes de régulation mécanique utilisés pour avoir un meilleur rendement, puis l'impact de l'énergie éolienne, ainsi que les différents types des machines utilisées dans l'éolienne.

Historique

Dès l'aube de l'humanité, le vent a été exploité pour en extraire de l'énergie mécanique, en effet depuis 3000 ans environ, il fût utilisé pour la propulsion des navires, pour les moulins à blé, ainsi que pour le pompage. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait dans ce domaine conçu un projet d'irrigation à partir de la puissance du vent. Les premiers moulins à vent firent leurs apparitions au milieu du XIXème siècle, ils furent aussi utilisés aux pays bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés.

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891, qui fut sans doute le pionnier dans ce domaine, d'associer une turbine éolienne à une génératrice.

Dès lors les chercheurs allèrent bon train, et les aérogénérateurs firent une apparition massive, avec près de 1 million dans le monde vers les années 60. La crise pétrolière de 1973, relança les études et les expériences cette fois ci à grande échelle. Actuellement, l'éveil et la prise de conscience du danger du réchauffement climatique dû aux gaz à effet de serre vont de nouveau relancer la recherche dans le domaine des énergies renouvelables en général et de l'énergie éolienne en particulier.

3.1 Situation énergétique mondiale

La consommation énergétique ne peut que croître, pour deux raisons : l'une est l'accroissement accéléré de la population, qui devrait atteindre huit milliards d'individus en 2050, l'autre réside dans le fait que les pays en développement ne peuvent élever leur niveau de vie qu'en augmentant notablement leur consommation énergétique. Cela laisse supposer une demande fortement croissante en énergie électrique dans les prochaines années.

Les énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolienne, géothermique..) ne représentent actuellement qu'environ 20 % de la production mondiale d'électricité ; en excluant l'hydroélectricité, ce taux tombe à 2 % [HIN 00]. Dans un contexte de crise énergétique mondiale sous-tendue par l'impératif d'un développement durable (problèmes environnementaux, épuisement des ressources fossiles, ...), les défis du futur énergétique nécessiteraient le développement des énergies renouvelables comme sources de substitution, propres et inépuisables.

Dans ce contexte, la filière éolienne représente le créneau à plus forte croissance dans la production d'électricité. Parallèlement au marché de la génération éolienne de forte puissance, se développent de plus en plus des systèmes de petite taille en site isolé. Ces derniers s'adaptent bien aux spécificités de notre pays, l'Algérie [YAS 08].

3.2 Descriptif et qualité de l'énergie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement des autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir oublié pendant longtemps cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers.

Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. En Europe, principalement sous l'impulsion Allemande, Scandinave et Espagnole, on comptait en 2000 environ 15000 MW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27000 MW de puissance éolienne installée dans le monde [MIR 05].

3.2.1 Définition de l'énergie éolienne

Un système éolien ou avec un autre terme un aérogénérateur ou encore une éolienne peut être défini comme étant : un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie

cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique [POI 03]. La plupart des aérogénérateurs commerciaux, surtout les grands, sont à axe horizontal. La part de marché représentée par les systèmes à axe vertical est minuscule. Les aérogénérateurs de grande taille sont parfois construits isolément ou rassemblés en groupes (parcs d'éoliennes) comportant dix éléments ou plus, parfois même des centaines. [ROG 04]

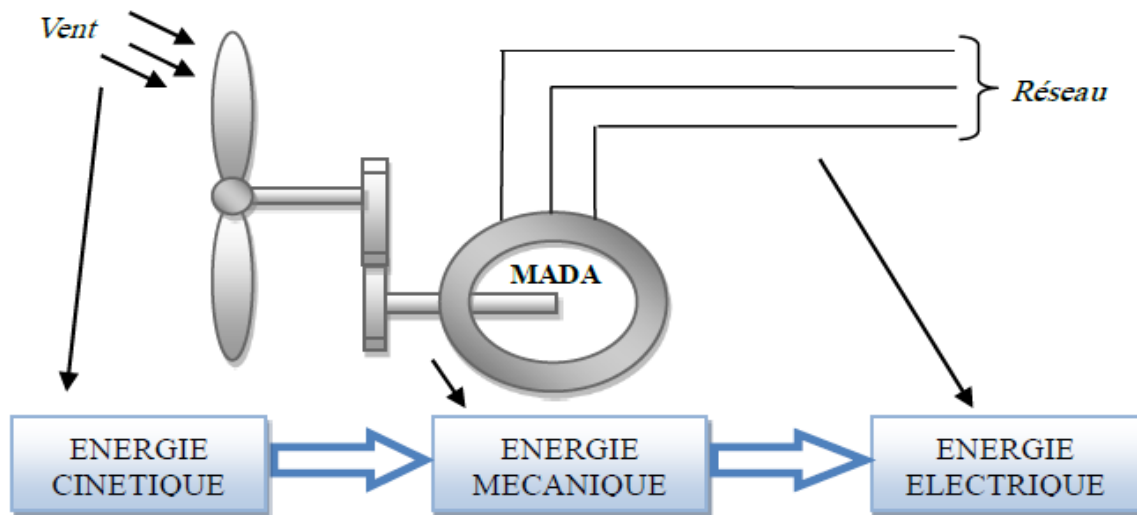


Figure 3.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent

3.2.2 Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de quatre éléments principaux:

3.2.2.1 Le mât

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique qui supporte la nacelle est le rotor de la turbine. Il est important qu'il soit assez élevé (40 à 60 m de hauteur pour une éolienne de 500 kW) pour exploiter les vents les plus forts en altitude. A l'intérieure de ceux-ci se trouve une échelle qui permet d'accéder à la nacelle pour l'entretien.

3.2.2.2 Les pales

Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

3.2.2.3 La nacelle

Elle rassemble tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, multiplicateur, roulement, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone, les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent).

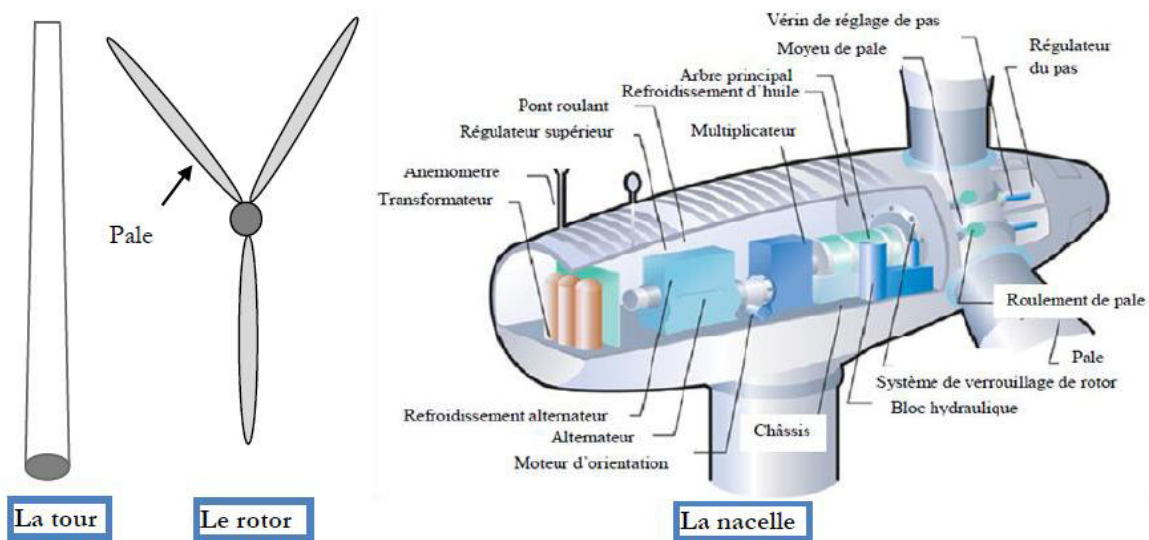


Figure 3.2 Principaux composants d'une éolienne

3.3 Différents types d'éoliennes

Dans la littérature, on classe les éoliennes en deux types sur le plan de structure, le premier type regroupe les éoliennes à axe vertical et le second regroupe les éoliennes à axe horizontal.

3.3.1 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical remplacent un peu aux roues hydrauliques. Elles sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. Deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation : [INT]

- Le rotor de SAVONIUS (du nom de son inventeur, breveté en 1925) ;
- Les éoliennes de DARRIEUS la plus répandue.

Les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées.

Les avantages théoriques d'une éolienne à axe vertical sont :

- Elle permet de placer la génératrice, le multiplicateur, et on n'a pas besoin de munir la machine d'une tour. [MUL 02]
- Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

Les inconvénients principaux d'une éolienne à axe vertical sont :

- Les vents sont assez faibles à proximité de la surface du sol.
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement. (Ainsi, il faut par exemple pousser les éoliennes de DARRIEUS pour qu'elles démarrent. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne).
- Pour remplacer le palier principal du rotor, il faut enlever tout le rotor.
- Les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses, mais elles sont très vite disparues du marché du fait de leur faible rendement et des fluctuations importantes de puissance provoquées. [ELA 04]
- Des 1988 Naqra et Dubé [NAQ 88] étudient le cas des turbines pour les éoliennes à axe vertical associés à des machines à rotor bobiné. Les simulations montrent que l'ondulation de la puissance électrique est sensiblement réduite et que le fonctionnement est stable lorsque la vitesse du vent varie.

3.3.2 Eoliennes à axe horizontal

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent. [MUL 02]

a. Avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.

b. Inconvénient

- Coût de construction très élevé.
- L'emplacement des appareillages au sommet de la tour gêne l'intervention en cas d'incident.

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant ; les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple.

3.3.4 Différentes technologies d'éoliennes

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles à vitesse constante et celles à vitesse variable.

3.3.4.1 Fonctionnement à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse *mec* \square est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. Le couple mécanique entraînant tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau.

a- Avantages

- Simplicité d'implantation.
- Plus grande fiabilité [CAM 03].
- Pas besoin de système de commande [ELA 04].
- Moins cher [CAM 03].

b- Inconvénient

- En vitesse fixe, le maximum théorique de puissance n'est pas atteint [14]. BEUGNIEZ, et T. GHENNAM [17] ont décrit le comportement dynamique d'une turbine éolienne à vitesse fixe raccordées au réseau électrique. Le modèle est développé sous environnement Matlab / Simulink sous forme d'une structure modulaire. Le système de commande de pas est utilisé pour la stabilisation de l'éolienne à de pannes du réseau. De cette façon, la stabilité de la tension du système avec des éoliennes raccordées au réseau peut être améliorée en utilisant une commande angle de la lame pour une réduction temporaire de la puissance éolienne lors d'un défaut de court-circuit dans la grille.

3.3.4.2 Fonctionnement à vitesse variable

Cette solution a une structure très peu différente par rapport à celle vue au paragraphe précédent, pourtant elle apporte des avantages remarquables. Elle utilise une machine asynchrone avec rotor bobiné connecté au réseau au moyen d'une interface d'électronique de puissance. Cette

interface est constituée de deux convertisseurs à interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture et permettant un transfert de puissance bidirectionnel.

a- Avantages

- Une meilleure exploitation de l'énergie du vent
- Une réduction des oscillations du couple et des efforts mécaniques

Il est possible d'augmenter la vitesse de rotation du rotor lors de rafales, tout en stockant l'énergie supplémentaire en forme d'énergie rotative jusqu'à la fin de la rafale. Cela requiert évidemment un système de contrôle très intelligent qui est en mesure de distinguer entre une vraie rafale et simplement des vitesses élevées du vent. De cette manière, on arrive à réduire le couple maximal.

[ELA 04]

b. Inconvénients de la vitesse variable

- Coût élevé.
- Convertisseur de puissance « complexe »
- Perte énergétique lors du processus de conversion CA-CC-CA.

BEUGNIEZ et GHENNAM [18] ont étudié une supervision centralisée du contrôle de la puissance réactive pour un parc éolien constitué de générateurs à vitesse variable. Une stratégie de distribution de pondération a été utilisée afin de déterminer la référence de puissance réactive pour chaque éolienne

3.4 Types de régulation de puissance

Il y a deux méthodes principales pour contrôler la puissance aérodynamique recueillie par la turbine et ainsi limiter cette puissance lorsque la vitesse du vent est trop élevée.

3.4.1 Un système à décrochage aérodynamique « stall »

Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale $n V$, l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure 3-3) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation [INT]. Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales.

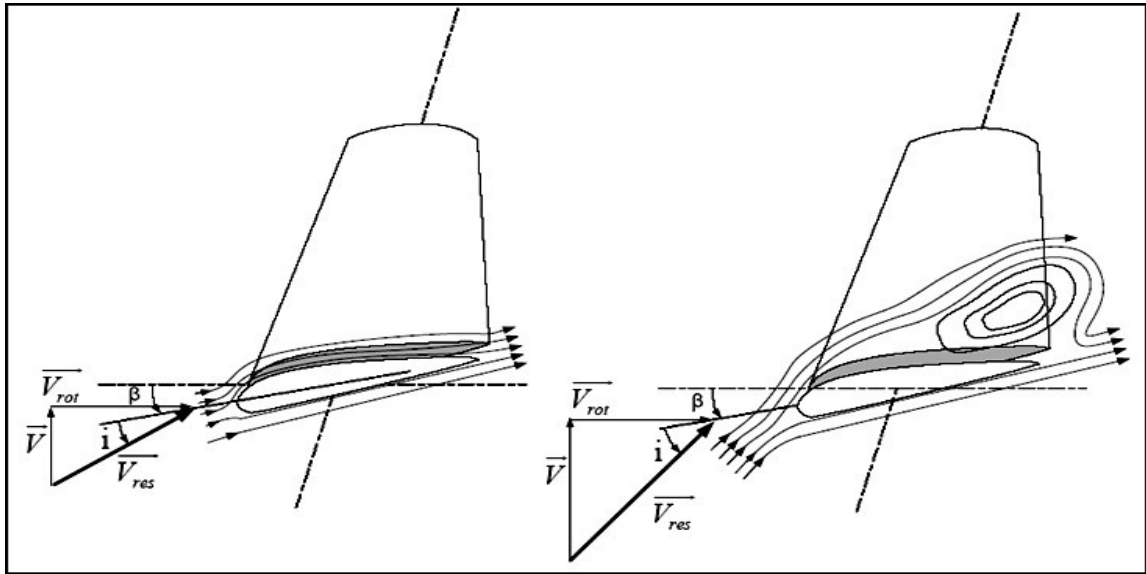


Figure 3.3 Flux d'air sur un profil de pale " stall "

Selon A. MILLER, et E. MULJADI [MIL 97], les éoliennes à vitesse variable, de puissance nettement supérieure, utilisent un système d'orientation des pales. Les constructeurs justifient ces choix par des considérations technico-économiques.

3.4.2 Un système d'orientation des pales « pitch »

L'utilisation d'un système d'orientation des pales permet, par une modification aérodynamique, de maintenir constante la puissance de la machine en fonction de la vitesse du vent et pour une vitesse du vent supérieure à la vitesse nominale. Le système d'orientation des pales a un coût très élevé par rapport au système à décrochage aérodynamique. La figure (3-4) illustre la variation de l'angle de décalage d'une pale.

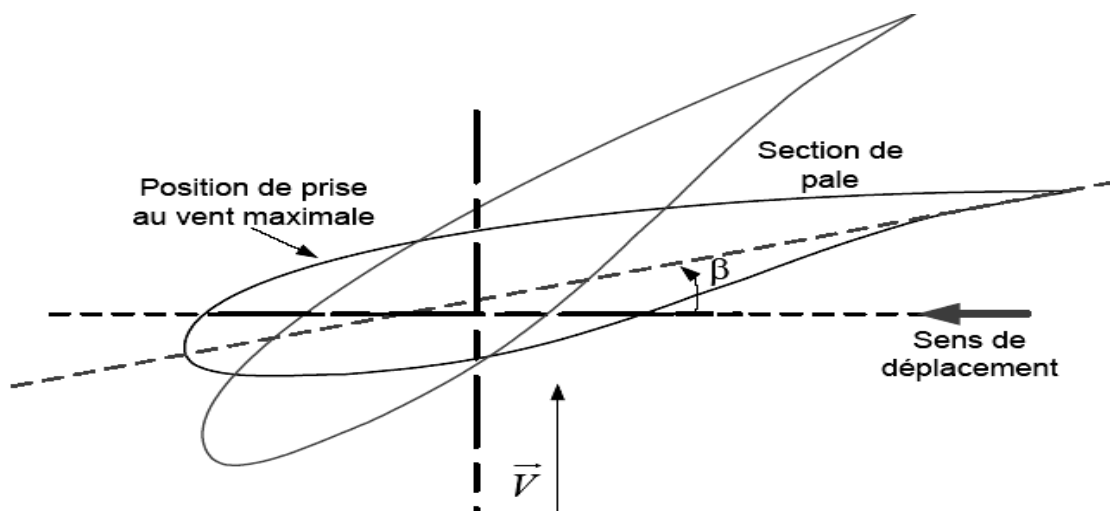


Figure 3.4 Variation de l'angle de calage d'une pale

CAMBLONG [CAM 03] étudie, la commande d'une éolienne à vitesse variable et régulation pitch. Il utilise pour cela une simulation numérique basée sur des modèles simples représentés sous formes d'équations d'état.

Le système de régulation de la puissance par orientation des pales possède les avantages suivants [ELA 04]:

- Il offre une production d'énergie plus importante que les éoliennes à décrochage aérodynamique pour la plage de fonctionnement correspondant aux fortes vitesses de vent.
- Il facilite le freinage de l'éolienne, en réduisant la prise du vent des pales, ce qui limite l'utilisation de freins puissants.
- Ce type de régulation réduit les efforts mécaniques lors des fonctionnements sous puissance nominale et sous grandes vitesses.

Ces avantages sont montrés dans l'article [MUL 99], MULJADI, et BUTTERFIEL ont étudié la commande d'une éolienne à vitesse variable avec régulation pitch. L'étude montre qu'il permet d'effectuer un contrôle actif de la puissance pour de larges variations de vent. Ce type de régulation réduit les efforts mécaniques lors des fonctionnements sous puissance nominale et sous grande vitesse et permet également de freiner la turbine si nécessaire. Certains aérogénérateurs combinent les avantages des deux systèmes en réalisant un contrôle stall-actif. En 2000, environ 60% des aérogénérateurs utilisaient la régulation « stall» mais les grandes machines d'aujourd'hui utilisent presque en exclusivité le contrôle «pitch» [CAM 03].

3.5 Intérêt de la vitesse variable

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la Figure 3-5.

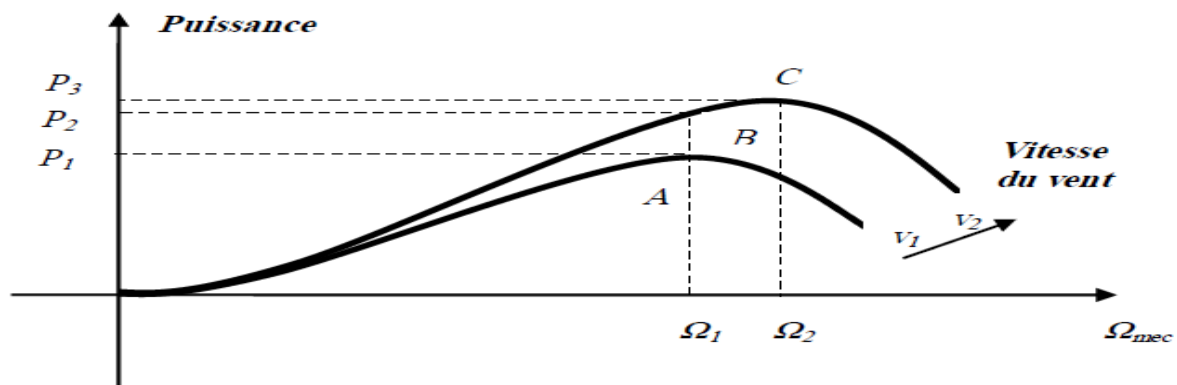


Figure 3.5 Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique

Pour une vitesse de vent v_1 et une vitesse mécanique de la génératrice ω_1 , on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à $2v_1$, et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure à $2\omega_1$. Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée. [ELA 04]

L'intérêt de la vitesse variable est montré par A.MILLER dans [MIL 97], il propose un contrôle avec la machine asynchrone, en utilisant des convertisseurs standards. Les simulations réalisées montrent que l'ondulation de la puissance électrique est sensiblement réduite et que le fonctionnement est stable lorsque la vitesse du vent varie. Ce contrôle montre une augmentation de l'énergie totale générée, avec la comparaison d'autres systèmes à vitesse fixe.

3.6 Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne à grande puissance

La caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones (Figure 3-6).

- La phase (zones I) de démarrage de la machine. : la production électrique commence lorsque la vitesse mécanique atteint environ 70% de la vitesse de synchronisme de la génératrice. La puissance électrique reste assez faible.
- La phase d'extraction de la puissance maximale (zones II) ou phase MPPT (Maximum PowerPoint Tracking) : dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale. La puissance électrique augmente rapidement. L'angle de calage des pales reste constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un coefficient de puissance C_p maximal. La puissance maximale est ainsi obtenue pour chaque valeur de la vitesse mécanique et pour des vitesses de vent moyennes (7-13 m/s environ)

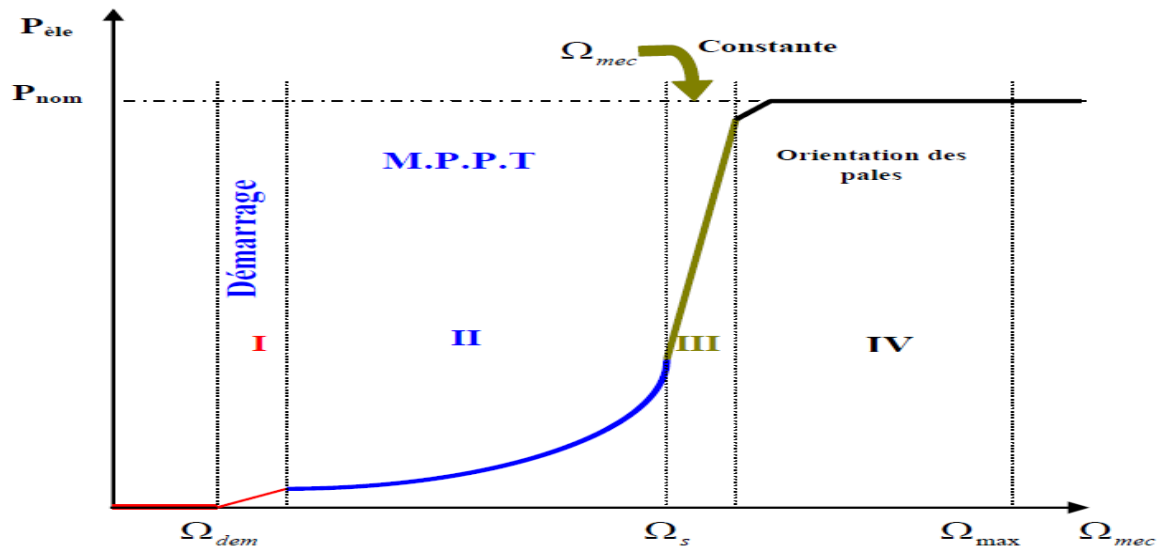


Figure 3.6 Zones de fonctionnement de la turbine

- La phase à vitesse mécanique quasi constante (zones III) : l'angle β de calage des pales varie afin d'obtenir une puissance électrique maximale pour différentes valeurs de vent. La puissance électrique augmente très rapidement jusqu'à sa valeur nominale.
- La phase à puissance constante (zones IV) : lorsque la vitesse du vent augmente encore, l'angle de calage des pales devient important afin de conserver la puissance électrique constante et nominale.

Par sécurité, si la vitesse du vent devient trop importante et risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe à 90° . C'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante.

3.6.1 Puissance éolienne disponible

Le vent est caractérisé par trois grandeurs variables pendant le temps : sa direction sa vitesse et son intensité. L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent, elle est fonction de la vitesse du vent, la densité de l'air et la surface balayée par les pales. En effet l'énergie cinétique du vent par unité de volume est :

$$E_c = \frac{1}{2} \rho_0 V^2 \quad (3.1)$$

Où ρ_0 : est la masse volumique de l'air généralement considérée comme constante et avoisinant en moyenne $1,25 \text{ kg/m}^3$.

V est la vitesse instantanée du vent en (m/s)

Le débit volumique est :

$$D = V A = V \pi r^2 \quad (3.2)$$

Où : A est la surface balayée par les pales ; r la longueur des pales et V est la vitesse du vent.

Ainsi la puissance disponible (énergie par unité de temps) est :

$$P = E_c \times D = \frac{1}{2} \rho_0 r^2 V^3 \quad (3.3)$$

On remarque ainsi que la puissance disponible varie avec le cube de la vitesse, le carré de la longueur des pales et la masse volumique de l'air.

3.6.2 Puissance éolienne récupérable (Théorème de Betz)

En effet, toute la puissance éolienne disponible ne peut pas être transformée en puissance mécanique par l'éolienne. Ainsi, en 1919 Albert Betz démontre que la puissance théorique maximale récupérable par une éolienne est égale à $16/27$ soit $0,59$ de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne [ZHA 00].

Ce résultat est connu sous le nom de « la loi de Betz ». Considérons une veine d'air telle que la section au niveau de l'éolienne est égale à la surface balayée par les pales (Fig.II.9). Les hypothèses sont celle d'un fluide parfait (pas de frottement) incompressible en régime permanent. Par conservation de la masse, le débit massique (m) le long de veine d'air est constant :

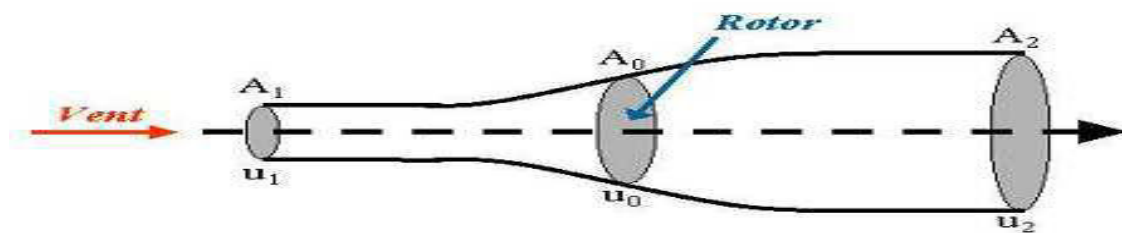


Figure 3.7 Veine d'air traversant la zone balayée par les pales d'une éolienne

$$m = \rho_c V_1 A_1 = \rho_c V_2 A_2 \quad (3.4)$$

Comme $V_1 > V_2$, on a bien $A_1 < A_2$. La puissance extraite par l'éolienne est :

$$P_c = P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho_0 (A_1 V_1^3 - A_2 V_2^3) \quad (3.5)$$

En utilisant l'équation (3.4) et en faisant l'hypothèse que $V_c = \frac{V_1 + V_2}{2}$ on a :

$$P_c = \frac{1}{2} \rho A_0 (V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{4} \rho A_0 (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2) \quad (3.6)$$

En divisant (3.6) par la puissance totale disponible, on fait alors apparaître le facteur de capacité :

$$F_{cap} = \frac{P_c}{\frac{1}{2}\rho A_0 V_1^3} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_2}{v_1} \right] \left[1 - \left[\frac{v_2}{v_1} \right]^2 \right] \quad (3.7)$$

Le facteur de capacité représente la fraction de la puissance totale du vent disponible qui est réellement extraite par l'éolienne. En notant $a = v_2/v_1$, on a :

$$F_c = \frac{1}{2} (1 + a)(1 - a^2) \quad (3.8)$$

On voit que C_p admet un maximum (Fig.3.8). En écrivant F_c par rapport à a , il suffit de résoudre une équation des seconds degrés pour déterminer la valeur de a qui correspond au maximum du coefficient de puissance :

$$\frac{dF_c}{da} = 0 \Leftrightarrow -3a^2 - 2a + 1 = 0 \quad (3.9)$$

Cette équation admet pour seule racine positive $a = 1/3$. On a alors $F_c = 16/27$.

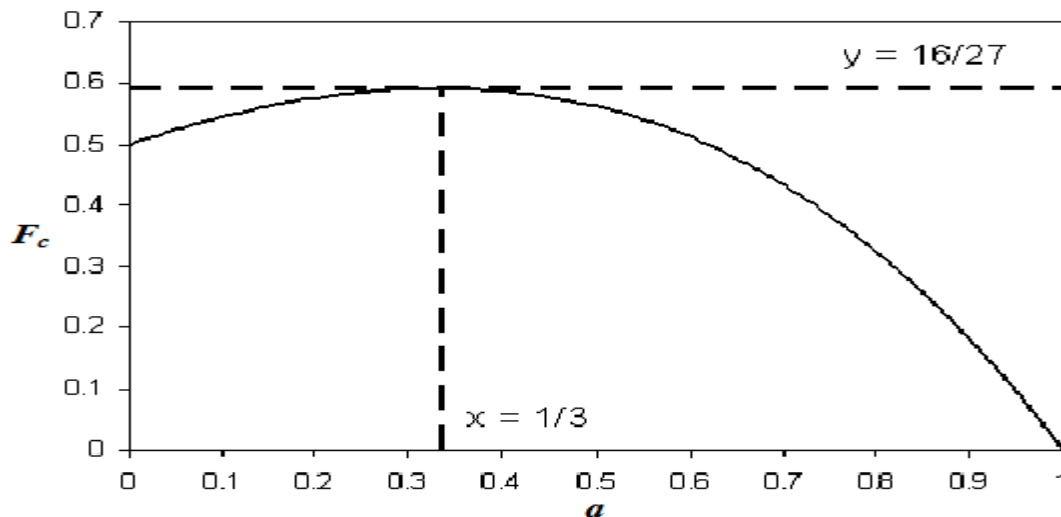


Figure 3.8 Évolution de F_c en fonction de a [39]

Ainsi, quelque soit la géométrie de l'éolienne, la puissance maximale que l'éolienne peut théoriquement extraire est égale à environ 60% de la puissance disponible. Il est aussi intéressant de connaître, à ce niveau, un facteur clé lié à la conception de l'éolienne (λ), Le coefficient de vitesse spécifique de l'éolienne (sans unité), λ , représente le rapport entre la vitesse du bout de la pale et celle du vent au niveau de l'axe rotor. On a donc :

$$\lambda = \frac{\Omega_r}{V_1} \quad (3.10)$$

Où : Ω_r : est la vitesse de rotation avant la transmission.

La Figure (3.9) [BEL 01], montre les facteurs de capacité obtenus selon le type d'éolienne en fonction de la vitesse spécifique λ . Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur facteur de capacité atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre une et trois pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation.

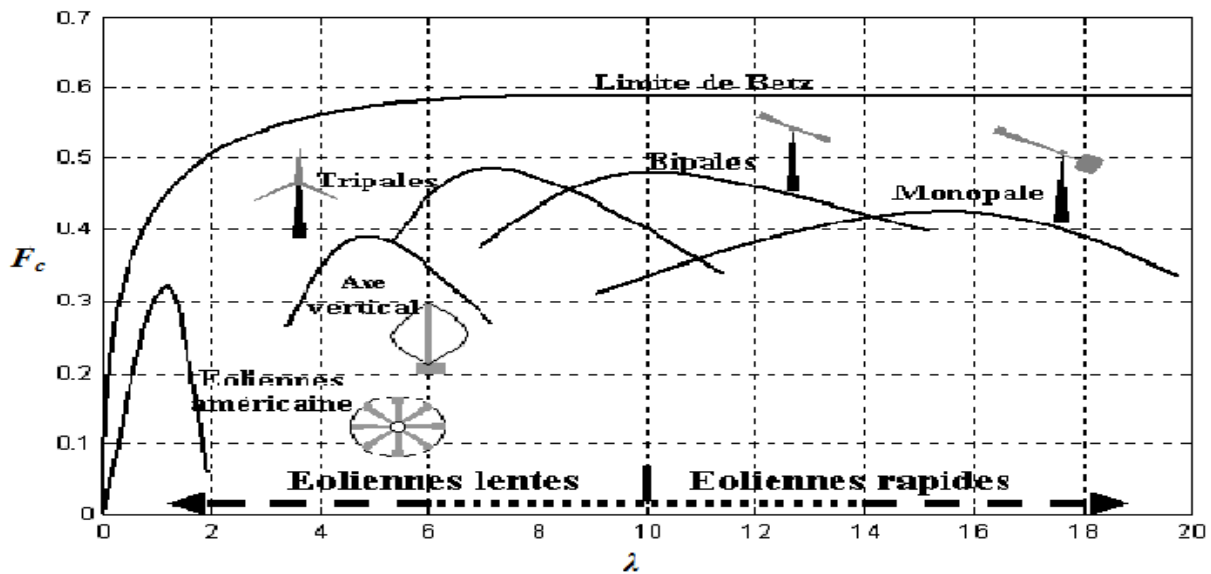


Figure 3.9 Facteur de capacité pour différents types d'éoliennes

3.6.3 Caractérisation horizontale de la vitesse de vent

On a vu d'après l'équation (3.3) que la puissance disponible varie avec la vitesse cubique moyenne du vent. Cette dernière étant déterminée à partir d'un traitement statistique des données vent brutes et le calcul des fréquences à un seuil donné de vitesse [THO 06].

3.6.4 Distribution de Weibull

Le modèle le plus utilisé pour traduire la variation des vitesses de vent est la loi de distribution de Weibull Sa densité de probabilité se présente sous la forme [42]:

$$f_v(v) = \frac{k}{c} \left[\frac{v}{c} \right]^{k-1} e^{-\left[\frac{v}{c} \right]^k} \quad (3.10)$$

En assimilant les fréquences aux probabilités, la densité de probabilité $f(V)$ représente la distribution en fréquences des vitesses mesurées. k et c sont des paramètres appelés communément les paramètres de Weibull. Le paramètre k (facteur de forme) est sans dimension et caractérise la forme de la distribution de fréquence alors que c détermine la qualité du vent (facteur d'échelle). Ce dernier a la dimension d'une vitesse. La détermination de ces paramètres permet la connaissance de la distribution des vents pour un site donné. Le traitement peut se faire directement ou en passant par les fréquences par classes en considérant les moyennes. La fonction de répartition est donnée par :

$$f(V \leq v_x) dV = \int_0^{v_x} f(V) dV = 1 - \exp \left[- \left[\frac{v_x}{c} \right]^k \right] \quad (3.11)$$

$$f(V \geq v_x) dV = \int_{v_x}^{\infty} f(V) dV = \exp \left[- \left[\frac{v_x}{c} \right]^k \right] \quad (3.12)$$

3.7 Impacts de l'énergie éolienne

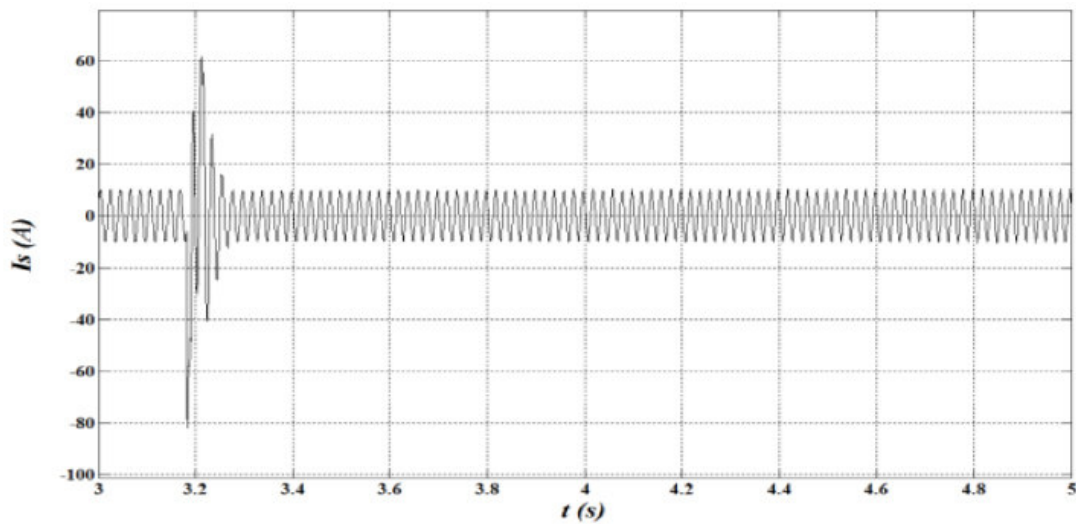
Les parcs éoliens n'avaient qu'une seule contrainte : produire quand il était possible de produire. De plus, le plan de protection était fait de telle sorte qu'en cas de défaut, le parc était déconnecté du réseau puis arrêté [LAV 05]. Ceci avait comme conséquence pour l'opérateur de réseau de subir un défaut entraînant la déconnexion du parc, donc d'une source de production considérable ce qui pose de vrais problèmes surtout aux heures de pointes. Pour contourner ce problème, des normes spécifiques à la production éolienne sont imposées pour la connexion des parcs éoliens aux réseaux électriques. [GAR 09]

3.7.1 Couplage au réseau

Le couplage au réseau est spécifique à la génération éolienne puisqu'il peut intervenir plusieurs fois par jour. De plus, il pose problème pour les systèmes sans interface de l'électronique de puissance (machine asynchrone à cage). La figure (3-10) montre l'évolution des courants statorique et rotorique d'une machine asynchrone de 3 kW lors d'un couplage brutal au réseau (la machine est entraînée à 1500 tr/min puis connectée au réseau).

Comme montré sur ces figures, l'appel en courant lors d'un couplage brutal peut atteindre 8 fois le courant nominal pour le stator, et 7 fois, voire plus, pour le rotor. La solution industrielle permettant de contourner ce problème consiste à utiliser un gradateur triphasé constitué de deux thyristors en tête-bêche par phase, qui sera court-circuité après le couplage. Ce problème ne se

pose pas pour les systèmes utilisant une interface d'électronique de puissance, le couplage se fait d'une manière plus douce en utilisant une commande appropriée



(a)

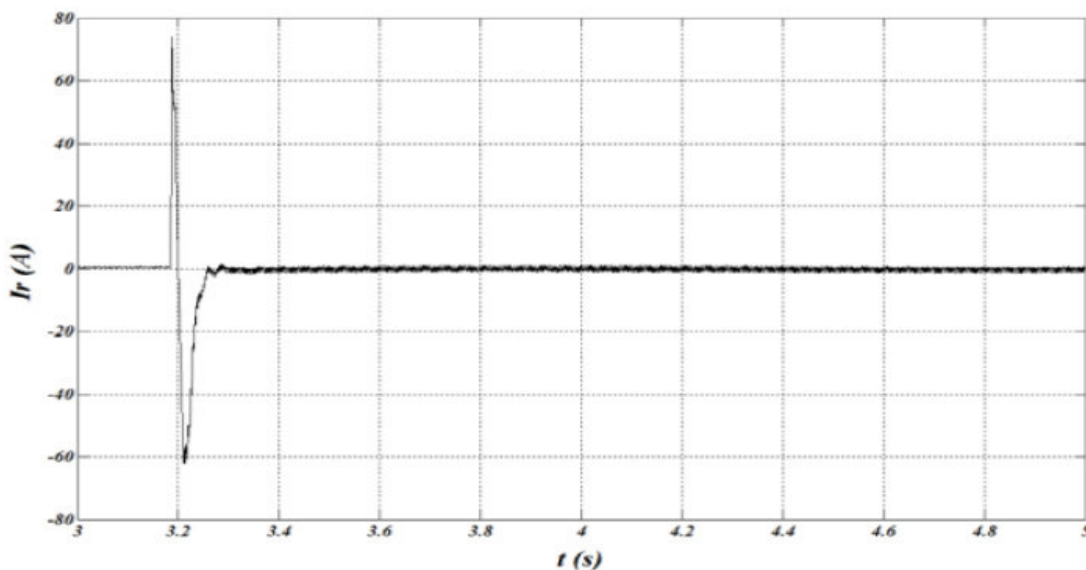


Figure 3.10 Evolution des courants d'une MAS à cage lors d'une connexion brutale au réseau. [GAR 09]

3.7.2 Fluctuations de puissance

En plus de non stabilité naturelle de la vitesse du vent, s'ajoutent les phénomènes déterministes tels que le cisaillement (variation de la vitesse du vent avec l'altitude) et l'effet d'ombre (passage d'une pale devant la tour de l'éolienne) pour générer la fluctuation de la puissance renvoyée au réseau par l'éolienne qui n'est pas toujours tolérable. Ce problème, qui entraîne parfois le déconnexion du réseau de l'éolienne, peut être atténué en utilisant des systèmes de stockage d'énergie et de grand nombre d'éoliennes dans un même parc.

3.7.3 Comportement sur creux de tension

Avant l'arrivée des nouvelles normes concernant les critères d'interconnexion aux réseaux électriques, il n'était pas permis qu'un parc éolien reste connecté au réseau si la tension au point de raccordement chute en-dessous de $85\% \cdot U$ ce qui pose problème de stabilité du réseau électrique. Ce problème oblige les opérateurs des réseaux électriques à adapter leurs critères à cette nouvelle source d'énergie.

3.7.4 Problématique de l'intermittence et de l'intégration de l'éolien dans le marché

Les différentes sources d'énergie sont appelées à participer à la satisfaction de la demande par ordre croissant de coût. La plupart des énergies renouvelables sont chères en coût de capital mais leurs coûts de fonctionnement et de maintenance sont faibles. Le déploiement de ces énergies change la structure d'approvisionnement « power supply » et réduit le prix marginal de l'électricité grâce à l'augmentation de la production à faible coût d'exploitation.

Bien que l'électricité éolienne ait des coûts variables assez faibles et que de nouvelles possibilités de transactions financières sont envisageables dans le marché, les problèmes de gestion de l'intermittence se posent à l'insertion de grandes quantités d'énergie éolienne dans le marché de l'électricité. Ces problèmes sont liés à l'organisation du marché et à la gestion de la variabilité de l'éolien dans le marché.

Conclusion

Une brève description du gisement éolien a été présentée dans ce chapitre. Quelques notions principales sur les différents types d'éoliennes dans le contexte de la génération électrique.

On a décrit les différents éléments d'une éolienne et les principales techniques adoptées pour la régulation de la puissance aérodynamique recueillie par la turbine (le calage variable ou le décrochage aérodynamique), ainsi que l'impact de l'intégration de l'énergie éolienne sur le réseau électrique qui va être développé pratiquement selon des tests dans le prochain chapitre.

Chapitre IV

APPLICATION

Résultats et interprétations

Introduction

L'opérateur de réseau électrique est toujours en confrontation avec plusieurs contraintes, souvent contradictoire. C'est dans ce cadre que notre travail vient pour trouver un compromis entre le coût de production, l'émission des gaz toxiques, les puissances générées et les pertes dans un réseau conventionnel puis dans ce dernier en intégrant des sources à énergie éolienne.

Afin de nous permettre d'accomplir la tâche citée ci-dessus, un modèle d'étude était élaboré pour aboutir à un état optimal désiré. Pour cela on a procédé à l'optimisation des fonctions objectives coût de production avec et sans sources d'énergie éoliennes ainsi que l'émission des gaz toxiques où on a utilisé des programmes sous l'environnement MATLAB à base des algorithmes génétiques.

4.1 Modèle d'étude

Pour l'application de notre travail, on a choisi un modèle de réseau électrique IEEE-30 jeux de barre, avec 06 unités de production conventionnelles comme première étape puis on intègre des fermes éoliennes dans le même réseau. En effet, le choix de ce modèle est justifié pour deux principales raisons :

- ✓ Ce modèle est représenté par un nombre moyen des JB, il offre la possibilité de l'appliquer sur des réseaux à taille supérieure ou inférieure.
- ✓ Ce modèle est standard, applicable pour des différentes études et il nous permet de comparer nos résultats avec d'autres méthodes.

4.2 Description du travail

Le problème d'écoulement de puissance optimal peut être résolu en réduisant le coût total de l'ensemble de générateurs disponibles dans le système d'alimentation. Le coût total de l'ensemble de générateurs disponibles peut être mathématiquement formulé en établissant la fonction objective. Ce dernier est la somme des coûts de fonctionnement de chaque générateur conventionnel disponible et les parcs éoliens. Ceci est exprimé de la manière suivante:

$$\begin{aligned} \text{Minimum (coût)} = & \sum_{i=1}^{ng} C_{Gi}(P_{Gi}) + \sum_{j=1}^{nw} C_{wj}(W_j) \\ & + \sum_{j=1}^{nw} C_{pwj}(W_{jav} - W_j) + \sum_{j=1}^{nw} C_{rwj}(W_j - W_{jav}) \quad (4.1) \end{aligned}$$

Où P_{Gi} est la puissance générée du générateur conventionnel i , W_j est l'énergie éolienne prévue (planifiée) du parc éolien j , $W_{j,av}$ est la puissance éolienne disponible du parc éolien j , C_{Gi} est la fonction de coût de fonctionnement du générateur classique i , C_{wj} est la fonction de coût de fonctionnement du parc éolien j , $C_{p.w,j}$ est la fonction de coût de pénalité pour ne pas

utiliser toute la puissance éolienne disponible du parc éolien i à cause de la surgénération, $C_{r,w,j}$ est la fonction de coût du parc éolien j pour appeler les réserves afin de couvrir le parc éolien j à cause de la sous-génération.

4.2.1 Coût de carburant du générateur classique

Généralement, la fonction de coût $C_{Gi}(P_{Gi})$ du générateur classique i est modélisée en utilisant une fonction polynomiale de deuxième ordre décrite comme suit:

$$C_{Gi}(P_{Gi}) = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (4.2)$$

Où : a_i, b_i et c_i sont les coefficients de coût du générateur classique i .

4.2.2 Fonction de coût de fonctionnement du parc éolien

La fonction de coût direct pour le parc éolien j est donnée par la relation suivante :

$$C_{w,j}(w_j) = d_j \times w_j \quad (4.3)$$

Où, d_j est le coefficient de coût direct du parc éolien

4.2.3 Fonction de coût à cause de la surgénération

Le coût de pénalité causant pour ne pas utiliser toute la puissance éolienne disponible est lié à la différence entre la puissance éolienne disponible et la puissance planifiée. Le modèle mathématique est écrit comme suit :

$$C_{p,w,i}(w_{i,av} - w_i) = k_{p,i}(w_{i,av} - w_i) = k_{p,i} \int_{w_i}^{w_{r,i}} (w - w_i) f_w(w) \cdot dw \quad (4.4)$$

Où $k_{p,i}$ est le coefficient de coût de pénalité pour la surgénération du parc éolien i .

$f_w(w)$ est la fonction de densité de probabilité (PDF) de production d'énergie éolienne (Probabilité de distribution de WEIBULL)

4.2.4 Fonction de coût à cause de la sous-génération

De même, la fonction de coût dû à l'appel des réserves à cause d'indisponibilité de la puissance éolienne pour satisfaire la demande est formulée comme suit :

$$C_{r,w,i}(w_i - w_{i,av}) = k_{r,i}(w_i - w_{i,av}) = k_{r,i} \int_{w_i}^{w_{r,i}} (w - w_i) f_w(w) \cdot dw \quad (4.5)$$

Où $k_{r,i}$ est le coefficient de coût de réserve pour la sous-génération du parc éolien i .

En effet, la distribution de la vitesse du vent est modélisée selon WEIBULL et indiquée dans la formule suivante :

$$f_v(v) = \frac{k}{c} \left[\frac{v}{c} \right]^{k-1} e^{-\left[\frac{v}{c} \right]^k} \quad (4.6)$$

Où v est la vitesse du vent, k est le facteur de forme, c est le paramètre d'échelle (m/s).

Alors, la probabilité de la distribution de la puissance éolienne peut être donnée sous la forme ci-dessous [MAK 13] :

$$f_w(w) = \frac{klv_i}{c} \left[\frac{(l+\rho \times l)v_i}{c} \right]^{k-1} \exp \left[- \left[\frac{(l+\rho \times l)v_i}{c} \right]^k \right] \quad (4.7)$$

Où

$-V_i$: est la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne fonctionne.

$$\rho = W/W_r \quad l = (V_r - V_i) /$$

Pour le calcul de $C_{p,w,i}$ et $C_{r,w,i}$ des équations (4.4) et (4.5), on fait appel à une méthode de l'intégration numérique qui est celle de Simpson

Nous développons ci-après une méthode qui permet de calculer, sur un intervalle fini $[a, b]$, l'intégrale définie $\int_a^b f(x) dx$ d'une fonction f continue donnée

Nous distinguerons deux optiques :

- la fonction à intégrer est remplacée par une fonction interpolante ou par une fonction d'approximation ;
- l'intégrale est approchée par une somme pondérée de valeurs prises par la fonction en des points situés dans un voisinage de $[a, b]$.

METHODE DE SIMPSON

Développons à présent une méthode d'ordre 4 qui équivaut à remplacer la fonction à intégrer par des paraboles définies sur des sous-intervalles comprenant trois abscisses d'intégration successives. (Approximation parabolique par morceaux)

On suppose que l'intervalle $[a, b]$ est partagé en n sous-intervalles égaux :

$[x_{i-1}, x_i]$, tels que $x_i = a + ih$, avec $h = (b-a)/n$.

On groupe les points par trois, n doit donc être pair

$a = x_0, x_1, x_2 \mid x_2, x_3, x_4 \mid \dots \mid x_{n-2}, x_{n-1}, x_n = b$.

Et on remplace, sur chaque intervalle $[x_{i-1}, x_{i+1}]$, la fonction f par une parabole.

Pour l'intervalle $[x_0, x_2]$, la courbe représentée par $f(x)$ est approchée par la parabole d'équation : et l'intégrale est alors approchée par :

$$\int_{x_0}^{x_2} f(x)dx \approx \int_{x_0}^{x_2} p(x)dx = \frac{h}{3} [f_0 + 4f_1 + f_2] \quad (4.8)$$

En répétant ce procédé pour les n (pair !) sous-intervalles, on a finalement la formule de

$$\text{Simpson : } \int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{3} [f_0 + 4f_1 + 2f_2 + 4f_3 + \dots + 2f_{n-2} + 4f_{n-1} + f_n] \quad (4.9)$$

Cette formule est exacte pour les polynômes $f(x)$ de degré ≤ 3 .

Notre travail consiste à l'étude du dispatching économique et environnemental sur un réseau test composé par 06 unités de production conventionnelles avec intégration des fermes éoliennes. Notons ici qu'on ne tient pas compte de l'emplacement des centrales.

Cette étude s'effectue en trois étapes :

4.2.5 Partie pratique

4.2.5.1 Première étape

Sur un réseau test composé de 06 unités de production conventionnelles.

- **But :** Minimisation mono objective des fonctions suivantes :
 - ✓ La fonction coût de production.
 - ✓ La fonction émission gaz toxique.

4.2.5.2 Deuxième étape

Sur un réseau test composé de 06 unités de production conventionnelles en intégrant des fermes éoliennes.

- ✓ Test 1 nombre d'éolienne = 15.
- ✓ Test 2 nombre d'éolienne = 20.
- ✓ Test 3 nombre d'éolienne = 25.

- **But** : Minimisation mono objective des fonctions suivantes :

- ✓ La fonction coût de production.
- ✓ La fonction émission gaz toxique.

4.2.5.3 Troisième étape

Sur un réseau test composé de 06 unités de production conventionnelles en intégrant des fermes éoliennes en étudiant l'impact de la pénalisation sur l'émission des gaz..

- **But** : Minimisation d'une seule fonction donnée par :

$$\sum_{i=1}^{ng} C_{Gi}(P_{Gi}) + \sum_{j=1}^{nw} C_{wj}(W_j) + \sum_{j=1}^{nw} C_{pwj}(W_{jav} - W_j) + \sum_{j=1}^{nw} C_{rwj}(W_j - W_{jav}) + C_{TAX} * E \quad (4.10)$$

Où

-C_Tax: taxe sur l'émission donnée en \$/kg.kg : c'est l'unité des gaz en émission

-E : Fonction émission des gaz en kg/h.

C_Tax=10 \$/kg C_wj=1.12 \$/MWh C_pwj=1 \$/MWh C_rwj=1 \$/MWh

4.2.6 Programmation sous MATLAB

- Paramètres de l'algorithme génétique

Les paramètres et leurs valeurs sont choisis ainsi :

- ✓ Le nombre des générations=300
- ✓ La taille de la population (le nombre d'individus dans la population) =.200
- ✓ Probabilité de mutation Pm=0.06
- ✓ Probabilité de croisement Pc=0.7

4.2.7 Résultats et interprétation

4.2.7.1 Première étape

Sur un réseau test composé de 06 unités de production conventionnelles.

Les données du réseau sont citées ci-dessous :

Tableau 4.1 Coefficients de la fonction coût et les capacités des générateurs

Générateurs	a_i	b_i	c_i	$P_{Gimin}(MW)$	$P_{Gimax}(MW)$
G ₁	0.010	2	10	5	50
G ₂	0.012	1.5	10	5	60
G ₃	0.004	1.8	20	5	100
G ₄	0.006	1	10	5	120
G ₅	0.004	1.8	20	5	100
G ₆	0.010	1.5	10	5	60

Tableau 4.2 Coefficients d'émission des gaz toxiques

Générateurs	$\alpha_i * 10^{-3}$	$\beta_i * 10^{-1}$	$\gamma_i * 10^1$	$\lambda_i * 10^{-2}$	$\zeta_i * 10^{-2}$
G ₁	6.49	-5.554	4.091	20	2.857
G ₂	5.638	-6.047	2.543	50	3.333
G ₃	4.586	-5.094	4.258	0.1	8
G ₄	3.38	-3.550	5.326	200	2
G ₅	4.586	-5.094	4.258	0.1	8
G ₆	5.151	-5.555	6.131	1	6.667

L'exécution du programme d'optimisation aboutit aux résultats décrits dans le tableau (4.3) qui correspondent à un coût optimal de **609.6026 \$/h**, des pertes de 2.1320 MW et des puissances générées illustrées dans le même tableau

Tableau 4.3 Résultats d'optimisation de la fonction coûts sans considération des sources à énergie éolienne

Puissances générées (MW)	Valeurs
P_{G1}	6.4485
P_{G2}	38.3823
P_{G3}	72.3505
P_{G4}	84.8802
P_{G5}	54.0681
P_{G6}	29.4009
La valeur de la fonction coût Optimisée (\$/h).	609.6036
La valeur de la fonction émission non-Optimisée (kg/h)	216.6411
La valeur des pertes non-Optimisée (MW)	2.1320

L'évolution de la fonction objective durant la simulation et en fonction des nombres de génération est décrite sur la Fig.4.2

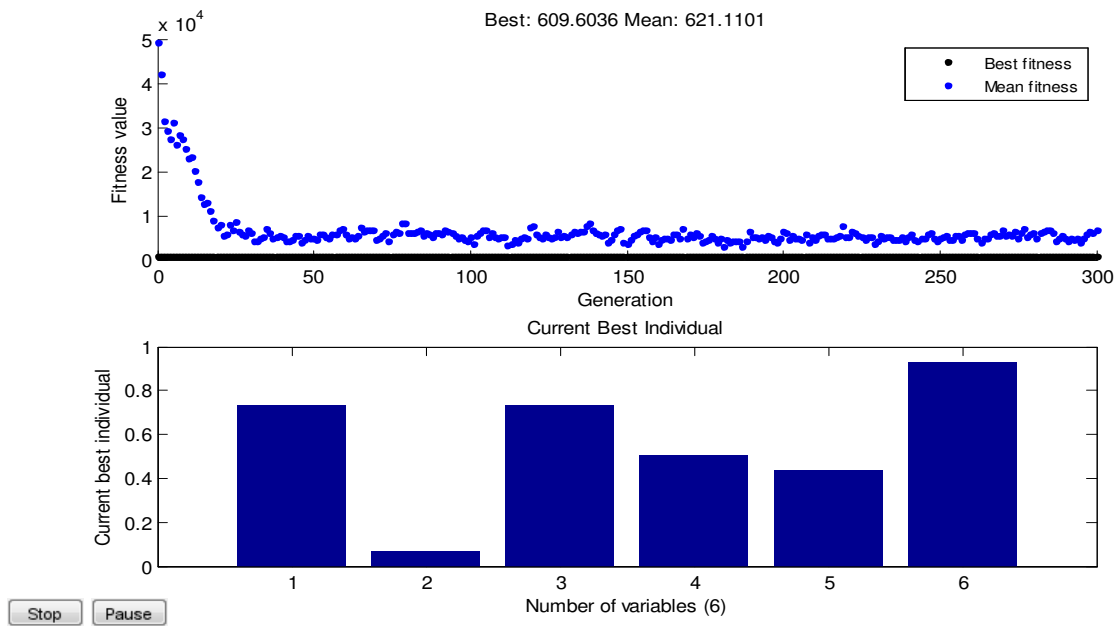


Figure 4.1 Optimisation de la fonction coût des unités conventionnelles

Le graphe est représenté par deux figures.

La première figure contient deux courbes :

- ✓ Celle en bleu représente l'évolution de la valeur moyenne de toutes les solutions en fonction des générations.
- ✓ Celle en noir représente l'évolution de la meilleure solution (pour le problème de minimisation) en fonction des générations.

Pour toutes les premières générations, l'écart entre les deux courbes est important suite à la nature aléatoire des solutions par contre au fil des générations cet écart commence à se réduire jusqu'à l'égalité pour aboutir à la meilleure solution.

-La deuxième figure représente les valeurs des variables de décision correspondants à la solution optimale de la fonction coût optimisée pour la génération courante.

4.2.7.2 Deuxième étape

Sur un réseau test composé de 06 unités de production conventionnelles en intégrant des fermes éoliennes

Nombre d'éolienne pris en considération égal à 15, 20 et 25

n_w est le nombre des éoliennes

FCc est le coût de production à partir des sources conventionnelles

Les résultats de simulation en optimisant le coût total de production à partir des deux sources conventionnelles et éoliennes sont illustrés dans le tableau (4.4). L'évolution de la fonction coût total durant la simulation en considérant la progression du nombre de générations est représentée sur les figures (4.3), (4.4) et (4.5) pour un nombre total des éoliennes respectivement égal à 15, 20 et 25.

Tableau 4.4 Résultats d'optimisation de la fonction coût total y compris les unités conventionnelles et les sources à énergie éoliennes

Puissances générées (MW)	Valeurs		
	$n_w=15$	$n_w=20$	$n_w=25$
P_{G1}	5.5652	20.4994	11.9876
P_{G2}	22.0317	39.8142	9.1620
P_{G3}	82.6258	55.6200	80.6357
P_{G4}	87.4663	59.8250	95.0089
P_{G5}	37.3245	82.0324	50.4158
P_{G6}	39.4660	11.1665	15.9191
W_e	10.6998	16.5797	22.0279
W_{ee}	0.7133	0.8290	0.8811
La valeur de la fonction coût Optimisée (\$/h).	616.4730	632.3505	622.4815
La valeur de la fonction coût FCc non Optimisée (\$/h)	587.2467	590.3064	567.8127
La valeur de la fonction émission non-Optimisée (kg/h)	223.7756	212.1756	234.2926
La valeur des pertes non-Optimisée (MW)	1.7815	2.1342	1.7575

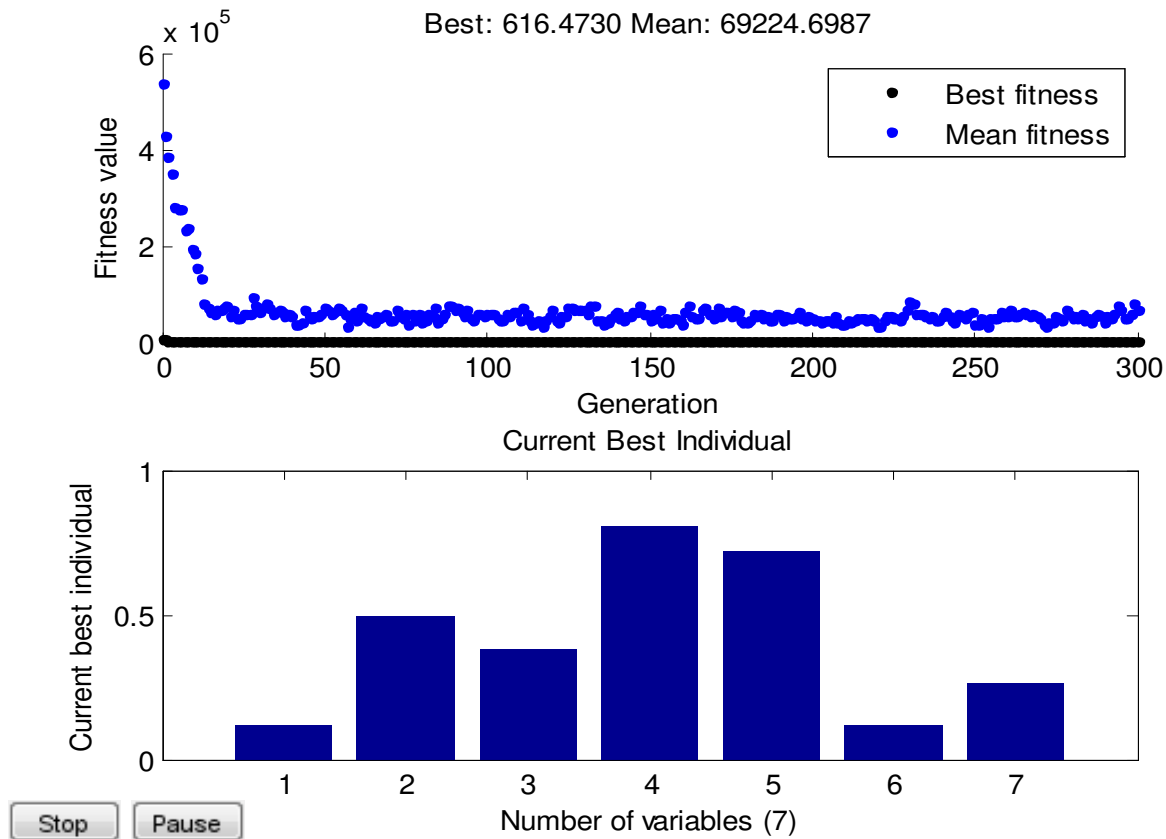


Figure 4.2 Optimisation de la fonction coût total compris les unités conventionnelles et les sources à énergie éolienne avec $n_w = 15$

En comparant la première situation (étape 1) avec celle de la deuxième c'est-à-dire lorsqu'on a intégré dans le réseau conventionnel une source à 15, 20 et 25 éoliennes, on constate que le coût total de production à partir des sources conventionnelles a diminué respectivement d'un taux de 3.67 %, 3.16 % et 6.86 % et qui correspondent respectivement à un taux de pénétration de l'énergie éolienne de 3.77 %, 5.84 % et 7.77 %.

D'après le tableau (4.4), le meilleur coût total optimal est celui qui correspond à un nombre des éoliennes égal à 15 qui est de 616.4730\$/h.

On remarque aussi que le coût de production des sources conventionnelles est minimal de 567.8127\$/h pour le cas où le nombre des éoliennes est égal à 25, tandis que l'émission totale des gaz est importante par rapport aux deux autres cas qui est de 234.2926kg/h, ce qui reflète l'aspect conflictuel entre le coût de génération (sources conventionnelles) et l'émission des gaz.

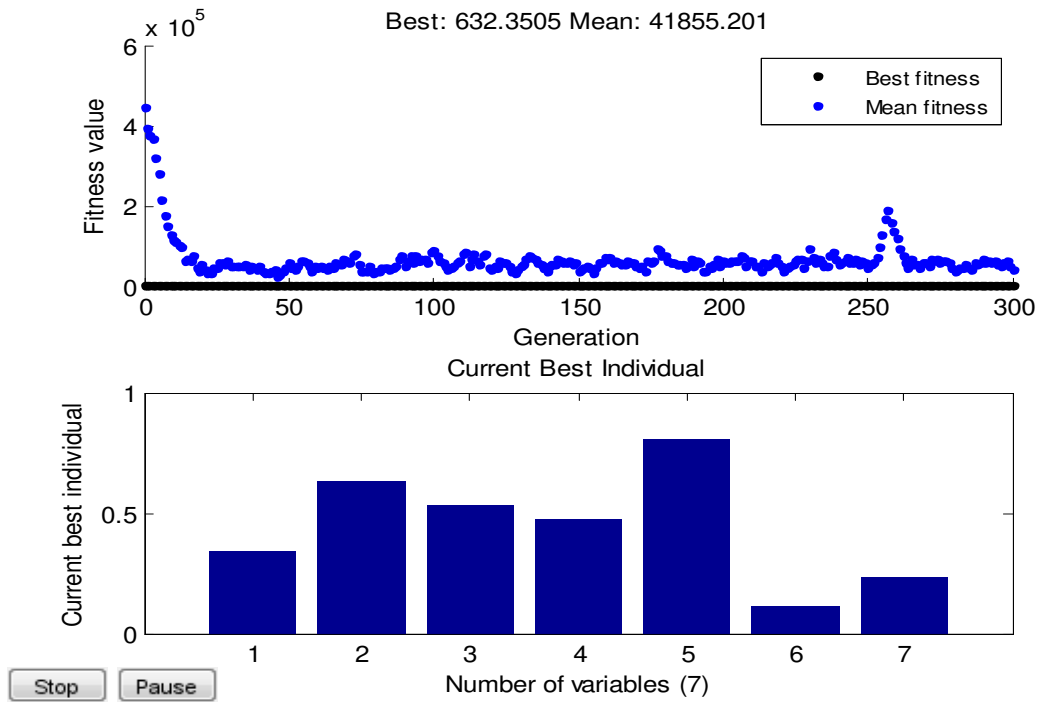


Figure 4.3 Optimisation de la fonction coût total des unités conventionnelles y compris des sources à énergie éoliennes $n_w = 20$

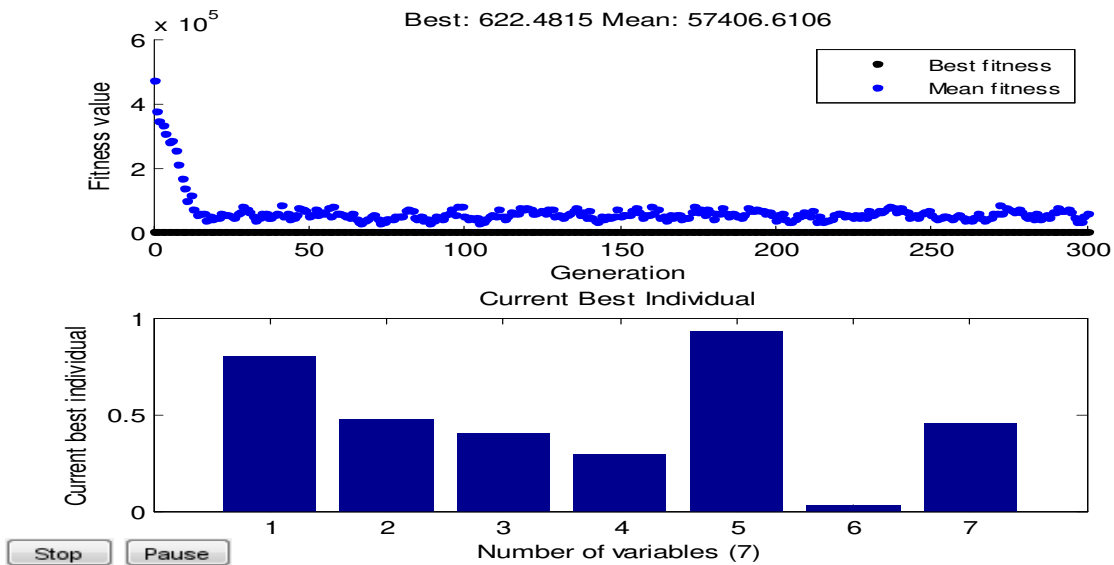


Figure 4.4 Optimisation de la fonction coût total des unités conventionnelles y compris des sources à énergie éoliennes $n_w = 25$

4.2.7.3 Troisième étape

Etude de l'effet de la pénalisation sur l'émission des gaz introduit comme un coût de pénalité dans la fonction augmentée (ajouté au coût total de production). Le nombre des éoliennes total est égal à 25.

Le problème devient celui d'une optimisation mono-objective en minimisant simultanément la fonction coût total de production et la fonction émission des gaz (pénalisé d'un coût C_{TAX} égal à 10 \$/Kg).

Les résultats de la simulation sont donnés sur le tableau (4.5) en se basant sur les résultats à la fin de l'exécution de l'algorithme d'optimisation relatif à la figure (4.6).

Tableau 4.5 Résultats d'optimisation de la fonction coût total des unités conventionnelles y compris des sources à énergie éoliennes avec pénalité sur les émissions des gaz

Puissances générée (MW)	Valeurs
P_{G1}	43.9004
P_{G2}	44.5945
P_{G3}	35.4828
P_{G4}	26.3078
P_{G5}	46.3335
P_{G6}	58.6530
W_e	31.8277
Wee	1.2731
La valeur de la fonction coût total Optimisée (\$/h)	2.6423×10^3
La valeur de la fonction coût FCc non Optimisée (\$/h)	591.5635
La valeur de la fonction émission non-Optimisée (Kg/h)	197.3752
La valeur des pertes non-Optimisée (MW)	3.7023

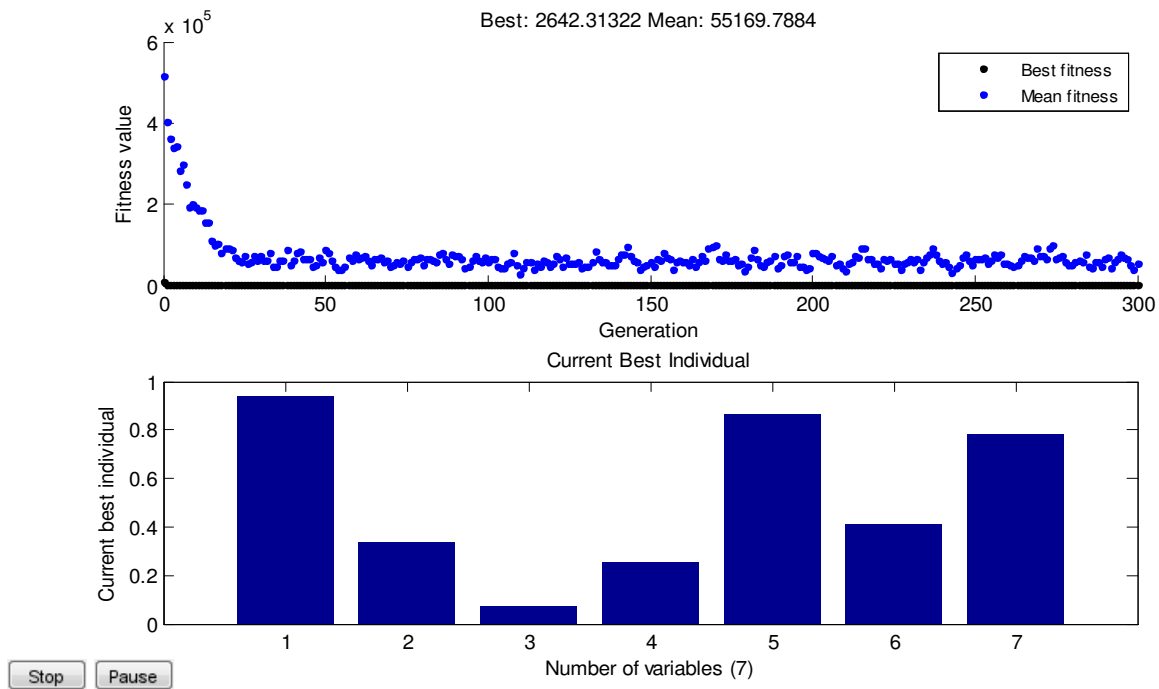


Figure 4.5 Optimisation de la fonction coût total des unités conventionnelles y compris des sources à énergie éoliennes avec pénalité sur les émissions des gaz

Le vecteur des puissances générées optimal vérifie les contraintes d'inégalité données par les capacités de génération minimales et maximales. On remarque une importante diminution du coût total de production issu des sources conventionnelles par rapport à celui optimisé dans le premier cas (seulement les sources conventionnelles). Pour l'émission des gaz, on constate une réduction remarquable à 197.3752 Kg/hpar rapport aux cas précédents.

Nous remarquons ici que la taxe imputée sur les émissions des gaz toxique a influé considérablement sur le coût total de production tandis que le coût de production des sources conventionnelles a diminué par rapport au premier cas et a augmenté par rapport au deuxième cas suite au conflit entre les deux fonctions coût et émission.

Conclusion

Dans ce chapitre consacré aux applications et simulations sur un réseau électrique IEEE à 30 jeux de barre avec 06 unités de production conventionnelles, on a élaboré des modèles d'étude sur l'optimisation du coût de production d'énergie sans et avec intégration des sources éoliennes. Le problème de la sécurité de l'environnement a été traité. Les modèles mathématiques proposés peuvent être extensible à d'autres réseaux de taille plus importante.

Le premier test était sur un réseau conventionnel où on a dégagé un coût optimal de production ainsi que la valeur de l'émission des gaz. Le résultat d'optimisation nous mène à confirmer l'existence d'un aspect conflictuel entre le coût de génération des sources conventionnelles et l'émission des gaz

Le deuxième test a touché le même réseau avec l'intégration d'un nombre variable d'éolienne égal à 15, 20 et 25, les résultats de simulation ont montré comme perspective qu'on peut élaborer un plan de planification pour l'intégration des sources éoliennes sous l'environnement de l'algorithme proposé

La dernière simulation était consacrée à l'étude de l'effet de pénalisation sur l'émission des gaz où on a montré son impact sur le coût total et le gain financier qu'on a préservé pour le cas des unités conventionnelles.

Conclusion générale

Dans ce mémoire on a présenté une contribution à la résolution du problème de dispatching économique et environnemental, et cela en intégrant de l'énergie éolienne dans les réseaux électriques conventionnels et voir son impact sur la gestion des ressources de production en raison de la nature aléatoire de la vitesse du vent, en effet trois approches ont été développées dans l'optique de résoudre ce problème.

Notre travail a commencé par l'étude du dispatching économique appliqué sur un réseau test IEEE 30 jeux de barres avec 06 unités de production conventionnelles, les résultats de simulation obtenus ont prouvé l'efficacité du programme élaboré et l'aptitude de la méthode méta-heuristique d'optimisation choisie, qui est l'algorithme génétique (AG) à résoudre des problèmes complexes.

Afin de donner une dimension multi objective à notre sujet, la notion de minimisation du taux d'émission des gaz toxiques était présente où on a intégré des sources à énergie éolienne dans notre ancien réseau.

En effet, les résultats escomptés convergent vers une logique attendue malgré l'aspect conflictuel entre le coût de production minimal et la valeur de la quantité d'émission des gaz toxiques.

Une nouvelle contrainte s'ajoute au problème et ce pour présenter l'effet de la prise en considération de la pénalisation sur l'émission des gaz introduit comme un coût de pénalité.

Nous remarquons ici que la taxe imputée sur les émissions des gaz toxiques influe considérablement sur le coût total de production tandis que le coût de production des sources conventionnelles diminue par rapport au premier cas et augmente par rapport au deuxième cas suite au conflit entre les deux fonctions coût et émission.

On peut conclure que d'après les résultats de simulation envisagés que l'intégration de l'énergie éolienne dans le réseau électrique classique a des avantages économiques et environnementaux. D'une part, elle réduit le coût de production de l'énergie électrique et d'autre part protège l'environnement contre la pollution résultante de la combustion du carburant mais elle favorise le risque de l'instabilité du système énergétique en raison de sa dépendance à la puissance du vent et la nature des générateurs.

Les résultats de simulation ont montré comme perspective qu'on peut élaborer un plan de planification pour l'intégration des sources éoliennes sous l'environnement de l'algorithme proposé et cela pour une formulation multi-objective.

En fin, on pense que notre modeste travail contribuera efficacement à l'ouverture de plusieurs fenêtres de recherches multi-objectives afin d'aboutir à un compromis entre les différentes fonctions objectives et touchera le cas le plus réel et cela pour des tailles plus importantes des réseaux.

Références Bibliographiques

- [MAH 14] B.MAHDAD Dispatching économique par MATLAB cours Université de BISKRA 2014
- [NAI 15] D.NAIMI Dispatching économique et environnemental chapitre 2 et optimisation non conventionnelle chapitre 3 cours Université de BISKRA 2015
- [SRI 94] N.Srinivas and L.M.Patnaik. « Genetic Algorithms :A.Survey ».IEEECompter,Vol 24, N°.6.pp.17-26,june 0994
- [HOL 75] John Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, Ann Harbor, 1975.
- [PHI 04] Philippe Audebaud TE de fin d'année Tutorat. Soutenu le 21/06/2004
- [GOL 89] Goldberg E. D., "Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning," Addison-Wesley publishers, 1989
- [MIC 99] Michalewicz Z., Deb K., Schmidt M. et Stidsen TH. (1999). "Evolutionary algorithms for engineering applications". pp.73-94.
- [TOM 99] Tomassini M. (1999). "Parallel and distributed evolutionary algorithms:Review". pp.113-133. Dans : "Evolutionary algorithms in engineering And computer science: recent advances in genetic algorithms, evolution strategies, evolutionary programming, genetic programming and industrial applications". Édité par : Makela M., Miettinen K., Neittaanmaki P. et Periaux J., Chichester; New York: Wiley, 500 p.
- [COE 02] CoelloCoello, Carlos A., Van Veldhuizen D.A. et Lamont G.B. 2002. Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems. Kluwer Academic Publishers, New York 576 p.
- [GOL 89] Goldberg D.E., (1994) , (1989).. (Algorithmes génétiques : exploration, optimisation et apprentissage automatique. Traduction de l'anglaisaméricain) par Vincent Corruble. Éditions Addison-Wesley France, 417 p.Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison Wesley Longman, 412 p.
- [DEB 99] Deb K. (2000), (1999).. Introduction to selection.: "Evolutionary computation 1:advanced algorithms and operators". Éditépar :Bäck T., Fogel D.B., et Michalewicz Z.; Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 331 p.
- [GOL 89] Goldberg D.E., (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison Wesley Longman, 412 p.
- [LAN 98] Langdon W.B. (1998). " Genetic programming and data structures:genetic programming + data structures = automatic programming !". Boston: Kluwer Academic Publishers, 278 p.
- [RYA 95] Ryan C. (2000), (1995). Automatic Re-Engineering of Software using Genetic Programming. Kluwer Academic Publishers, 140 p. . "Niche and species formation in genetic algorithms". Dans :Practical handbook of genetic algorithms: applications, volume 1. Éditépar : Lance Chambers, pp.57-74.
- [CER 99] Cerrolaza M. et Annicchiarico W. (1999). "Genetic algorithms in shape optimization : finite and boundary element applications",pp.283- 323. par: Makela M., Miettinen K., Neittaanmaki P. et Periaux J.,Chichester; NewYork: Wiley, 500 p .
- [CAN 00] Cantù-Paz E., (2000). Efficient and accurate parallel genetic algorithms. Kluwer Academic Publishers, Boston, 162 p.

- [COE 00] CoelloCoello, Carlos A. (2000). "An updated survey of GA-based multiobjective optimization techniques". ACM Computing Surveys ACM Press, Vol. 32, No 2, pp.109-143.
- [HOR 94] Horn J., Nafpliotis N. et D.E. Goldberg (1994). "A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization". Dans : Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence, Vol. 1, pp. 82-87, Piscataway, New Jersey. IEEE Service Center.
- [ERI 01] Erickson M., Mayer A. et Horn J., (2001). "The Niche Pareto Genetic Algorithm 2 Applied to the Design of Groundwater Remediation Systems" Dans : Eckart Zitzler, Kalyanmoy Deb, Lothar Thiele, Carlos A. CoelloCoello, et David Corne, éditeurs, First International Conference on Evolutionary Multi- Criterion Optimization, pp. 681-695. Springer-Verlag. Lecture Notes in Computer Science, No 1993, pp. 681-695.
- [SRI 94] Srinivas N. et Deb K. (1994). "Multiobjective Optimization using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms". Evolutionary Computation, Vol. 2, No 3, pp. 221-248
- [HOR 94] Deb K., Pratap A., Agarwal S. et Meyarivan T. (2002). "A Fast And Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II." IEEE Transactions on Evolutionary Computation Vol. 6, No 2, pp.182– 197
- [MIR 05] A. MIRECKI, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance," Thèse de Doctorat, Institut national Polytechnique, Toulouse, 2005.
- [HIN 00] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, IEEE Press., New York , 2000.
- [YAS 08] F. YASSA, B. BATOUN, and R. KHANICHE, "Study of Wind Resources in Algeria Based upon Satellite Data," International Conference on Ecological Vehicles & Renewable Energies, EVER'08, Monaco, March 27-30, 2008
- [POI 03] F. POITIERS, " Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne (machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée au réseaux)," Thèse de Doctorat de génie électrique, Université Nantes, France, 2003.
- [ROG 04] V. ROGEZ, "Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire, " Thèse de Doctorat, Université d'Artois, France, 2004.
- [INT] Site Internet de l'Association Danoise de l'Industrie Eolienne, www.windpower.org.
- [MUL 02] B. MULTON, O. GERGAUD, and H. BEN AHMED, "Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques," Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables", ISBN 2-912154-8-1, 2002
- [04ELA] S.EL AIMANI, "Modélisation de différentes technologies éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension," Thèse de Doctorat , Ecole Centrale de Lille et l'Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2004
- [MAQ 88] H.L .NAQRA, B. DUBÉ, "Slip power recovery induction generators for large vertical axis wind turbine," IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 3, No. 4, December 1988, pp.733- 737.
- [CAM 03] H. CAMBLONG , "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable," Thèse de Doctorat, l'Ecole Nationale Supérieure D'Art et Métiers, 2003
- [MUL 99] MULJADI, BUTTERFIELD, "Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation", Industry Applications Conference. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting Conference Record of the 1999 IEEE, 3-7 Oct. 1999, pp. 323 – 330, vol.1.

- [MIL 97] A. MILLER, E. MULJADI, and D. S. ZINGER, "A Variable Speed Wind Turbine Power Control," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No. 2, June 1997, pp. 181-186
- [ZHA 00] P. ZHANG, A.H. COONICK, "Coordinated Synthesis of PSS Parameters in multi-machine Power Systems Using the method of inequalities Applied to Genetic Algorithms," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 2, May 2000, pp. 811-816.
- [BEL 01] K. BELACHEHEB, "Contribution à l'étude des systèmes de compensation FACTS en général, UPFC en particulier, pour le contrôle du transit de puissance dans un réseau de transport," Thèse de Doctorat, Université de Henri Poincare Nancy, 2001.
- [THO 06] J. L. THOMAS, " Les systems flexibles de transport et de distribution électrique FACTS," 10eme entretien Physique – industrie, Paris, 19 Octobre 2006.
- [DUP 06] S. DUPUIS, FPMS," L'électronique de puissance dans les réseaux de transport, FACTS," Journée d'étude du groupe de contact FNRS-GREPES Electronique de puissance, 22 mars 2006.
- [LAV 05] N. LAVERDURE, " Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires," Thèse Doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble, 2005.
- [GAR 09] M. GARCÍA, M. PAZ COMECH. " Voltage dip generator for wind energy systems up to 5 MW," .Applied Energy, Volume 86, Issue 4, pp 565-574, Elsevier 2009.
- [MAK 13] S. Makhloufi 1*, A. Mekhaldi 2†, M. Tegar 2, D. Saheb-Koussa 1 and A. Djoudi
Optimal power flow solution including wind power generation into isolated Adrar power system using PSO GSA Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER2013