

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

## MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

**Énergies Renouvelables**

*Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique*

Intitulé :

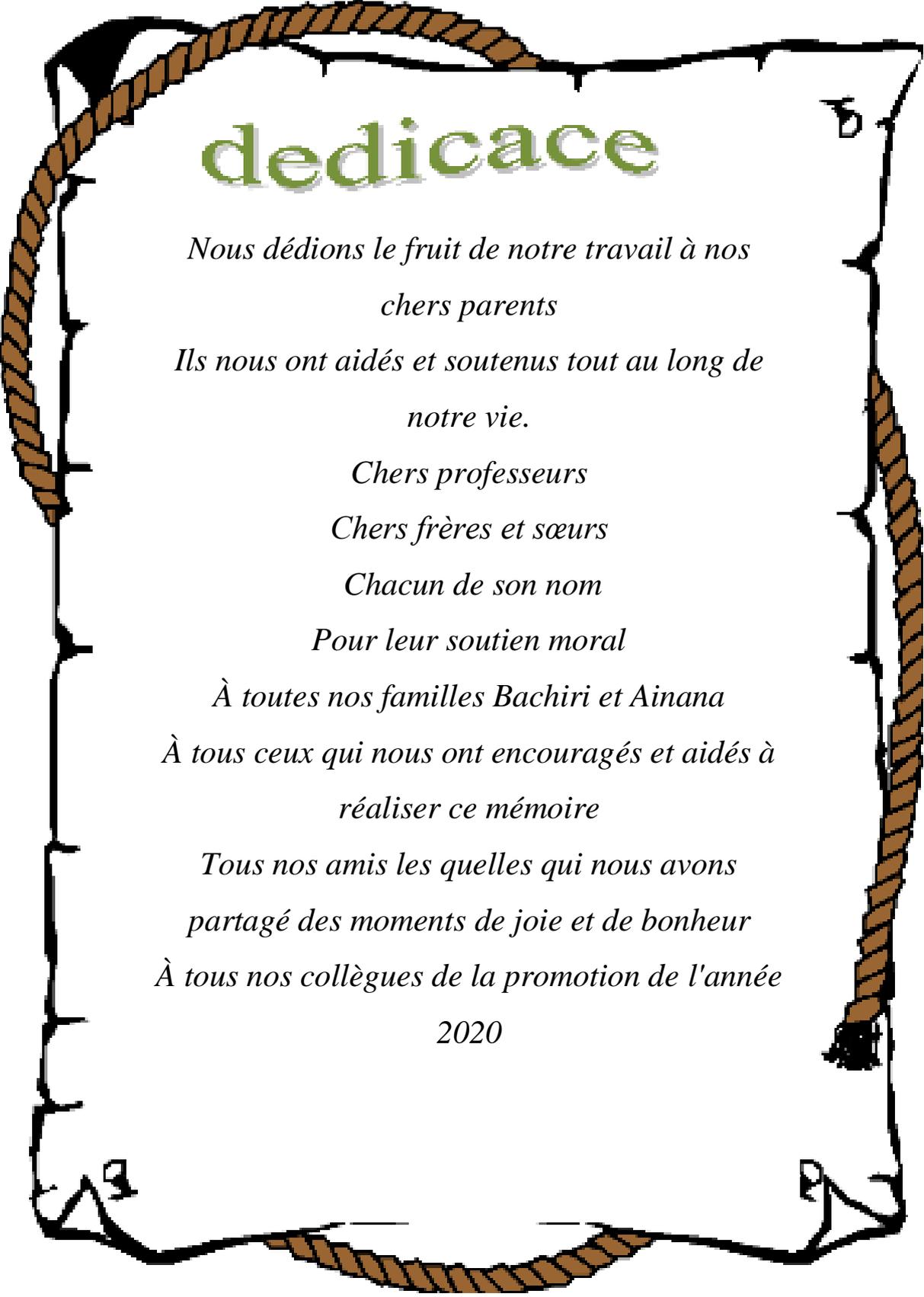
**Simulation de Dispatching Combiné Economique/  
Environnemental (CEED) en Présence d'une Source à Energie  
Renouvelable (SER)**

**Présenté par :**

- BACHIRI Nariman
- AINANA Achouak

*Soutenu le : 24/06/2020..... Devant le Jury :*

<b>M. TAIBI Bouziane</b>	<b>MAA</b>	<b>Centre Universitaire Naâma</b>	<b>Président</b>
<b>M. HABCHI Yassine</b>	<b>MCB</b>	<b>Centre Universitaire Naâma</b>	<b>Encadreur</b>
<b>M. BOUDDOU Riyadh</b>	<b>Dr</b>	<b>Centre Universitaire Naâma</b>	<b>Co-Encadreur</b>
<b>M. KHASSAM Medjdoub</b>	<b>Dr</b>	<b>Centre Universitaire Naâma</b>	<b>Examineur</b>



# dedicace

*Nous dédions le fruit de notre travail à nos  
chers parents*

*Ils nous ont aidés et soutenus tout au long de  
notre vie.*

*Chers professeurs*

*Chers frères et sœurs*

*Chacun de son nom*

*Pour leur soutien moral*

*À toutes nos familles Bachiri et Ainana*

*À tous ceux qui nous ont encouragés et aidés à  
réaliser ce mémoire*

*Tous nos amis les quelles qui nous avons  
partagé des moments de joie et de bonheur*

*À tous nos collègues de la promotion de l'année*

*2020*

# Remerciement

*Tout d'abord, nous remercions et exprimons notre gratitude à Dieu qui nous a donné patience et volonté pour que nous puissions nous continuons ce travail.*

*Nous remercions monsieur HABCHI Yassine maitre de conférence classe B au centre universitaire SALHI Ahmed et monsieur BOUDDOU Riyadhhd doctorant au centre universitaire SALHI Ahmed pour leurs encadrement de ce mémoire, et surtout pour leurs qualités Scientifiques et humaines.*

*Nous remercions également sincèrement le président du jury ainsi qu'aux les examinateurs qui ont acceptés de juger ce travail.*

*Nous remercions également tous nos collègues pour leur soutien Morale durant cette année de préparation de ce mémoire.*

## **Résumé**

Actuellement, les sources d'énergie renouvelables (SER) sont devenues l'un des sujets principaux des études sur les systèmes électriques et une tendance dans la production d'électricité.

De nos jours, le concept de micro-réseau apparaît comme l'alternative naturelle aux systèmes électriques conventionnels, qui offrent une alternative efficace et durable pour l'utilisation intégrale des énergies renouvelables.

Ce mémoire propose un modèle convexe de dispatching économique/environnemental combinées (CEED) prenant en compte les SER dans un environnement de micro-réseau.

Une nouvelle méthodologie basée sur l'algorithme PQ ( Programme quadratique ) est mise en œuvre sur un système de micro-réseau IEEE îloté de 6 unités comprenant six générateurs thermiques conventionnels, un parc éolien et un système solaire photovoltaïque afin d'évaluer l'impact économique de l'inclusion des sources renouvelables dans le micro-réseau pour les études et la résolution de problème du CEED.

L'approche proposée envisage l'exploitation efficace d'un micro- réseau avec un cout totale de production de l'énergie électrique réduis et des émissions polluantes minimales en tenant compte de diverses sources d'énergie renouvelables, ce qui en fait une méthodologie pratique à appliquer dans des conditions d'exploitation en temps réel. En outre, les résultats sont comparés avec d'autres méthodes récentes, ce qui permet de valider la précision et la qualité de la méthode d'optimisation étudiée.

### **Les mots clés**

Dispatching Économique/Environnementale ; Sources D'énergie Renouvelables (SER) ; Micro-Réseau ; CEED ; programme quadratique (PQ).

## **Abstract**

Currently, renewable energy sources (RES) have become one of the main subjects of power system studies and a trend in electricity production.

Nowadays, the micro-grid concept is emerging as the natural alternative to conventional electrical systems, which offer an efficient and sustainable alternative for the integral use of renewable energies.

This thesis proposes a convex model of combined economic/environmental dispatching (CEED) taking into account RES in a micro-grid environment.

A new methodology based on the quadratic program (QP) algorithm is implemented on a 6-unit IEEE islanded microgrid system consisting of six conventional thermal generators, a wind farm and a solar photovoltaic system to evaluate the economic impact of including renewable sources in the microgrid for CEED studies and problem solving.

The proposed approach envisages the efficient operation of a micro-grid with reduced total cost of electricity production and minimal pollutant emissions by taking into account various renewable energy sources, making it a practical methodology to be applied under real-time operating conditions. In addition, the results are compared with other recent methods, thus validating the accuracy and quality of the optimization method studied.

### **The key words**

Economic/Environmental Dispatching; Renewable Energy Sources (RES); Micro-Grid; CEED ; Quadratic program (QP).

## ملخص

في الوقت الحالي، أصبحت مصادر الطاقة المتجددة (RES) أحد الموضوعات الرئيسية للدراسات حول الأنظمة الكهربائية واتجاهاً في توليد الطاقة.

في الوقت الحاضر ، يظهر مفهوم شبكة Micro-grid كبديل طبيعي للأنظمة الكهربائية التقليدية ، والتي توفر بديلاً فعالاً ومستداماً للاستخدام الكامل للطاقات المتجددة.

تقترح هذه الرسالة نموذجاً محدثاً للإرسال الاقتصادي / البيئي المشترك (CEED) مع الأخذ في الاعتبار RES في بيئة الشبكة الدقيقة.

تم تطبيق منهجية جديدة تعتمد على البرنامج التريبيعي (QP) على نظام شبكة IEEE الجزرية المكونة من 6 وحدات تضم ستة مولدات حرارية تقليدية ومزرعة رياح ونظام شمسي كهروضوئي من أجل تقييم الأثر الاقتصادي لإدراج المصادر المتجددة في الشبكة الدقيقة لدراسات CEED وحل المشكلات.

يتوخى النهج المقترح التشغيل الفعال لشبكة متناهية الصغر بتكلفة إجمالية لإنتاج الطاقة الكهربائية والحد الأدنى من الانبعاثات الملوثة مع مراعاة مصادر الطاقة المتجددة المختلفة ، مما يجعلها منهجية عملية. ليتم تطبيقها تحت ظروف التشغيل في الوقت الحقيقي. بالإضافة إلى ذلك ، تتم مقارنة النتائج مع الطرق الحديثة الأخرى ، والتي تؤكد صحة وجودة طريقة التحسين المدروسة.

## الكلمات المفتاحية

الارسال الاقتصادي / البيئي ؛ مصادر الطاقة المتجددة (RES) ؛ شبكة الصغرى ؛ CEED؛ البرنامج التريبيعي (QP).

## Sommaire

Dédicace	
Remerciement	
Introduction générale	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les systèmes à énergie renouvelable</b>	
I.1 Introduction	2
I.2 Historique	2
I.3 Les énergies renouvelables	3
I.3.1 Système hydraulique	4
I.3.2 Système de la biomasse	6
I.3.3 Système géothermique	7
I.3.3.1 Le principe de fonctionnement de l'énergie géothermie	8
I.3.4 Système solaire	9
I.3.4.1 Conversion de la lumière en électricité	11
I.3.4.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	11
I.3.4.3 Technologie des cellules solaires	12
I.3.4.4 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	12
I.3.5 Système éolienne	13
I.3.5.1 Principe de la conversion de l'énergie éolienne	13
I.3.5.2 Principaux composants d'une éolienne	14
I.3.5.3 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne	17
I.4 Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie	18
I.4.1 Potentiel solaire	18
I.4.2 Potentiel éolien	19
I.4.3 Les énergies géothermiques, issues de la biomasse et hydrauliques	19
I.5 Conclusion	20
<b>Chapitre II : Les micros réseaux électriques</b>	
II.1 Introduction	21

II.2 Historique	21
II.3 Le micro-réseau	22
II.4 Evolution du système électrique : émergence du concept de smart grids	22
II.4.1 Une demande croissante	23
II.4.2 Le coût d'énergie	23
II.5 Avantages et les inconvénients des réseaux intelligents	24
II.6 Le principe de fonctionnement d'un micro-réseau	24
II.6.1 Le fonctionnement de micro-réseau	24
II.6.2 La connexion de micro-réseau avec le réseau	25
II.7 Architecture des micros-réseaux	26
II.7.1 Infrastructure des systèmes intelligents	26
II.7.2 Système intelligent de management	26
II.7.3 Système intelligent de protection	26
II.8. Structure d'un micro-réseau	27
II.9 Configuration d'un micro-réseau	28
II.10 Classification de micro-réseau	29
II.11 Caractéristique d'un micro-réseau	30
II.12 Comparaison entre le réseau électrique traditionnel et le réseau électrique intelligent	30
II.12.1 Flux d'énergie	31
II.12.2 Flux de données	32
II.12.3 Mix de production	33
II.13 Technologies des micros-réseaux	34
II.13.1 Outils de mesure	34
II.13.1.1 PMU: Phasor Measurement Units	34
II.13.1.2 Capteurs	34
II.13.1.3 Compteurs intelligents	36
II.13.2 Systèmes de contrôle et de détection	36
II.13.2.1 Système SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)	36

II.13.2.2 Indicateurs de défaut (Fault passage indicators FPI	36
II.13.3 Intégration des énergies renouvelables	37
II.13.4 Stockage d'énergie électrique	37
II.13.5 Infrastructure énergétique	38
II.13.5.1 FACTS (Flexible Alternatif Current Transmission Systems)	38
II.13.5.2 HVDC (High Voltage Direct Current)	39
II.14 Conclusion	39
<b>Chapitre III : Les problèmes d'optimisation multi-objective (CEED)</b>	
III.1 Introduction	41
III.2 Historique des techniques d'optimisations	41
III.3 Formulation mathématique d'un problème d'optimisation	42
III.4 Les éléments d'optimisation	42
III.4.1 Définitions générales	43
III.5 Un problème multi-objectif	43
III.5.1 Variables de décision	44
III.5.2 La convexité	44
III.6 Dispatchabilité	45
III.6.1 Dispatching économique et environnementale	45
III.6.1.1 Minimisation du coût du carburant	45
III.6.1.2 Minimisation des émissions de SO <sub>2</sub>	45
III.6.1.3 Minimisation des NO <sub>x</sub>	46
III.6.2 Dispatching économique et environnementale combiné (CEED)	46
III.7 Le modèle mathématique de dispatching économique	46
III.8 Le modèle mathématique de dispatching environnementale	47
III.9 L'intégration de l'énergie éolienne dans le réseau électrique	47
III.9.1 L'énergie éolienne	47
III.9.1 Les turbines éoliennes	48

III.10 L'intégration de l'énergie solaire	48
III.11 Les Méthodes d'optimisations	49
III.11.1 Les méthodes déterministes	49
III.11.2 Méthodes Heuristiques	50
III.11.2.1 La méthode de Hooke et Jeeves	50
III.11.2.2 Méthode de Rosenberg	50
III.11.3 Les Méthodes Analytiques	51
III.11.3.1 La méthode de Newton Raphson	51
III.11.3.2 Méthode Quasi- Newton	51
III.11.4 Les méthodes d'optimisation stochastiques	51
III.11.5 Les méthodes métaheuristiques	52
III.11.5.1 L'algorithme génétique	52
III.11.5.2 Optimisation par Essaim de Particules	54
III.11.5.3 Colonie de Fourmis	56
III.12 Programmation quadratique	57
III.12.1 Les étapes de l'algorithme QP	57
III.13 Conclusion	59
<b>Chapitre IV : Simulation et discussion des résultats</b>	
IV.1 Introduction	60
IV.2 Cas de base	61
IV.3 L'intégration de l'énergie solaire	65
IV.4 L'intégration de l'énergie éolienne	70
IV.5 Conclusion	77
Conclusion générale	78
Références	79

## Liste des figures

Figure I.1 : Les différentes sources d'énergie renouvelables	4
Figure I.2 : L'énergie Hydraulique	4
Figure I.3 : Système Hydrolienne	5
Figure I.4 : Système Marémotrice	5
Figure I.5 : Barrages Hydraulique	6
Figure I.6 : Système de la biomasse	6
Figure I.7 : Géothermie haute énergie	7
Figure I.8 : Géothermie base énergie	8
Figure I.9 : Système géothermique	8
Figure I.10 : Système solaire	9
Figure I.11 : Système solaire thermique	10
Figure I.12 : Système solaire photovoltaïque	10
Figure I.13 : Conversion de l'énergie solaire en électricité	11
Figure I.14 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	12
Figure I.15 : Système eolien	13
Figure I.16: Conversion de l'énergie cinétique du vent	14
Figure I.17 : Structure générale d'une éolienne	15
Figure I.18 : Vue éclatée d'une aérogénérateur	15
Figure I.19 : Eolienne à axe horizontal (A); Eolienne à axe vertical (B)	17
Figure I.20 : Carte de l'irradiation en Algérie (mois de juillet)	18
Figure I.21 : Carte des vents en Algérie	19
Figure II.1 : Evolution de la consommation mondiale	23

Figure II.2 : le principe de fonctionnement d'un micro réseau	26
Figure II.3 : Architecture du réseau intelligent avec des systèmes et sous-systèmes associé	27
Figure II.4 : Structure générale d'un micro-réseau	28
Figure II.5 : Classification de micro-réseau	29
Figure II.6 : Flux d'énergie du réseau existant	31
Figure II.7 : Flux énergétique du réseau intelligent	32
Figure II.8 : Flux de données de réseau actuel	32
Figure II.9 : Flux de données du réseau intelligent	33
Figure II.10 : Mix de production électrique des États-Unis en 2015	33
Figure III.1 : Eléments indispensables pour l'optimisation	43
Figure III.2 : Définition de E, F et f	44
Figure III.3 : Exemples d'ensemble convexe et d'ensemble non convexe	45
Figure III.4: Les méthodes déterministes Multi- objectifs	49
Figure III.5 : Les méthodes stochastiques	52
Figure III.6 : Organigramme L'algorithme génétique	53
Figure III.7 : Principe de déplacement d'un point de recherche par PSO	56
Figure III.8 : Faculté d'une colonie de fourmis de retrouver le chemin le plus court	57
Figure III.9 : Organigramme de l'algorithme quadratique programme (QP)	58
Figure IV.1: Diagramme schématique montrant l'effet de l'intégration des énergies renouvelables sur le réseau électrique	61
Figure IV.2: Le coût de production en fonction de puissance	63
Figure IV.3 : Les émissions en fonction de puissance	64

Figure IV.4 : Les pertes en fonction de puissance	64
Figure IV.5 : Le coût de production des coefficients de source solaire	67
Figure IV. 6 : L'émission en fonction des coefficients de source solaire	68
Figure IV.7 : les pertes en fonction des coefficients de source solaire	68
Figure IV.8 : Le coût de production en fonction de la puissance minimale et maximale de source éolienne	72
Figure IV.9 : L'émission en fonction de la puissance minimale et maximale de source éolienne	73
Figure IV.10 : Les pertes en fonction de la puissance minimale et maximale de source éolienne	73
Figure IV.11: Les coûts de production des trois essais utilisées	75
Figure IV.12 : Les émissions des trois essais utilisés	75
Figure IV.13 : Les pertes des trois essais utilisés	76

## Liste Des Tableaux

Tableau II.01 : Comparaison entre le réseau électrique traditionnel et intelligent	31
Tableau IV.01 Les Coefficients de coût du carburant et limites de puissance	62
Tableau IV.02 Les Coefficients d'émission de gaz	62
Tableau IV.03 Résultats du problème de la répartition économique et des émissions combinées (CEED) pour le système à 6 unités utilisant quadratique programme (QP)	63
Tableau IV.04 La puissance minimale et maximale et les coefficients d'une source solaire	65
Tableau IV.05 Résultats du CEED avec l'énergie solaire pour une demande de 700 MW et $Cs1= 0.22\$/kWh$	65
Tableau IV.06 Résultats du CEED avec l'énergie solaire pour une demande de 700 MW et $Cs2= 0.23\$/kWh$	66
Tableau IV.07 Résultats du CEED avec l'énergie solaire pour une demande de 700 MW et $Cs3= 0.24\$/kWh$	66
Tableau IV.08 Résultats du CEED avec l'énergie solaire pour une demande de 700 MW et $Cs4= 0.25\$/kWh$	66
Tableau IV.09 Résultats du CEED avec l'énergie solaire pour une demande de 700 MW et $Cs5= 0.27\$/kWh$	67
Tableau IV.10 Résultats du CEED avec l'énergie solaire pour des demandes de 500MW, 700 MW, 900MW et $Cs5= 0.27\$/kWh$	69
Tableau IV.11 La puissance minimal et maximale et le coefficient d'une source éolienne	70
Tableau IV.12 Résultats du CEED avec l'énergie éolienne pour une demande de 700 MW avec le coefficient éolienne $Ce=3.7\$/MWh$ et $P_{min}=P_{max}= 5MW$	70
Tableau IV.13 Résultats du CEED avec l'énergie éolienne pour une demande de 700 MW avec le coefficient éolienne $Ce=3.7\$/MWh$ et $P_{min}=P_{max}= 10MW$	71
Tableau IV.14 Résultats du CEED avec l'énergie éolienne pour une demande de 700 MW avec le coefficient éolienne $Ce=3.7\$/MWh$ et $P_{min}=P_{max}= 15MW$	71
Tableau IV.15 Résultats du CEED avec l'énergie éolienne pour une demande de 700 MW avec le coefficient éolienne $Ce=3.7\$/MWh$ et $P_{min}=P_{max}= 20MW$	71
Tableau IV.16 Résultats du CEED avec l'énergie éolienne pour des demandes de 500MW, 700 MW, 900MW et $P_{min}=P_{max}=20MW$ avec le même coefficient $Ce=3.7\$/MWh$	74

## Liste des symboles et abréviations

### Liste des symboles

$v_{id}^k$  : Vitesse du courant de l'individu  $i$  dans la dimension  $d$  à l'itération  $k$ .

$v_{id}^{k+1}$  : Vitesse de l'individu  $i$  dans la dimension  $d$  à l'itération  $k+1$ .

$v_{id}^{min} \leq v_{id}^k \leq v_{id}^{max}$  : Vitesse maximale et minimale.

$x_{id}^k$  : Position actuelle de l'individu  $i$  dans la dimension  $d$  à l'itération  $k$ .

$x_{id}^{k+1}$  : Position de l'individu  $i$  dans la dimension  $d$  à l'itération  $k+1$ .

$pbest_{id}$  : Dimension  $d$  de la  $pbest$  de l'individu  $i$ .

$gbest_d$  : Dimension  $d$  de  $gbest$  de l'essaim.

$iter^{max}$  : Nombre maximum d'itérations.

$iter$  : Numéro d'itération actuel.

$w^{max}$  : Poids d'inertie maximal.

$w^{min}$  : Poids d'inertie minimum.

$P_{imin}$  : Limite minimale de production de la puissance générée d'une centrale  $i$ .

$P_{imax}$  : Limite maximale de production de la puissance générée d'une centrale  $i$ .

PD : La puissance totale demandée.

### Liste des abréviations

ER      Energie Renouvelables

N-R     Newton-Raphson

G-S     Gauss-Seidel

DE      Dispatching Economique.

AG      Algorithme Génétique

PSO     Algorithmes Essaims Particulaires

CEED    Combined Economic Emission Dispatch

MW Méga Watt

SER Sources D'énergies Renouvelables

FACT Système flexible de transmission de courant alternatif

PQ Programme quadratique

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Toute entreprise chargée de la production d'énergie électrique doit assurer, les demandes des utilisateurs en puissances actives et réactives. L'entreprise doit garantir la qualité et le coût réduit [1]. Il faut tout d'abord résoudre les problèmes d'ordre technique et économique pour bien exploiter un réseau électrique donné. Des fois, on est confronté au problème de la répartition économique des puissances [2]. La solution consiste de produire au maximum les unités ayant le meilleur rendement. Les frais d'entretien augmentent considérablement car l'abus de fonctionnement des machines diminue leurs durées de vie.

Le dispatching économique des unités de production d'énergie électrique a une grande importance dans l'industrie de l'énergie en raison de l'immense interconnexion de réseaux d'électricité, la crise mondiale de l'énergie et la hausse continue des prix [3]. Pour que la pollution, le coût de fonctionnement du réseau soit minimal, il faut planifier les puissances actives et réactives de chaque centrale électrique. Il est essentiel de varier ces puissances des générateurs avec coût minimal du combustible, minimiser l'émission de pollution et utiliser les sources d'énergies renouvelables [4]. Ce processus est appelé l'écoulement de puissance optimal ou le problème du dispatching économique [5-6-7-8].

Le concept de micro-réseau apparaît comme l'alternative naturelle aux systèmes électriques conventionnels, qui offrent une solution efficace et durable pour l'utilisation intégrale des énergies renouvelables [9]. Une nouvelle méthodologie basée sur l'algorithme QP (Quadratic Programming) est mise en œuvre sur un système de micro-réseau IEEE afin d'évaluer l'impact économique de l'inclusion des sources énergies renouvelables (SER) dans le micro-réseau pour les études et la résolution de problème du CEED (Dispatching économique /environnemental combinées) [10].

Pour cela, nous avons structuré notre travail comme suite :

Le premier chapitre décrit la définition des sources énergies renouvelables, le deuxième chapitre concerne les études de micro-réseau, dans le troisième chapitre, la modélisation des problèmes de dispatching économique et environnemental combiné (CEED) et le dernier chapitre a consacré des résultats de simulation.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur les systèmes à énergie renouvelable**

## I.1 Introduction

Les énergies renouvelables peuvent devenir la principale option d'approvisionnement énergétique dans les économies à faible intensité de carbone. Des transformations radicales dans tous les systèmes énergétiques sont nécessaires pour exploiter les ressources énergétiques renouvelables largement disponibles. L'organisation de la transition énergétique entre les énergies non durables et les énergies renouvelables est souvent décrite comme le principal défi de la première moitié du 21<sup>ème</sup> siècle. L'innovation technologique, l'économie (coûts et prix) et les politiques doivent être alignées pour réaliser pleinement le potentiel des énergies renouvelables, et les obstacles à cette croissance doivent être levés.

Dans ces dernières années les énergies renouvelables connue une grande croissance parmi ces énergies : l'énergie solaire, éolien, hydraulique, biomasse et ainsi l'énergie géothermie [11-12].

Ce chapitre est consacré sur les systèmes à base d'une énergie renouvelable et ainsi leurs principes de fonctionnement dans le domaine électrique.

## I.2 Historique

### L'énergie solaire :

- En 1839, le français Antoine Edmond Becquerel fut le premier à mettre en évidence cette conversion particulière d'énergie.
- En 1930, le développement des cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium.
- Les premiers générateurs ont été utilisés en 1958 pour les satellites Vanguard en Floride.

### L'énergie éolienne :

- En 1888, un scientifique américain Charles F. Brush, a construit la première turbine éolienne capable de produire une puissance électrique de 12 kW [13].
- En 1920, le scientifique français Georges J.M. Darrieus développe le concept d'un rotor à axe vertical [14].

**La biomasse :**

- En 1840, première utilisation commerciale d'un gazéifieur de biomasse. L'appareil est fabriqué en France.
- En 1890, le charbon commence à remplacer le bois pour la production de vapeur.
- En 1900, l'huile végétale est utilisée comme remplacement du diesel quand l'inventeur allemand Rudolf Diesel fait la démonstration qu'un moteur diesel peut fonctionner avec de l'huile d'arachide.

**La géothermie :**

- En 1904, dans la ville de Lardello en Italie, la géothermie est utilisée la première fois pour produire de l'électricité
- En 1911, la première centrale ouvre ses portes en Italie

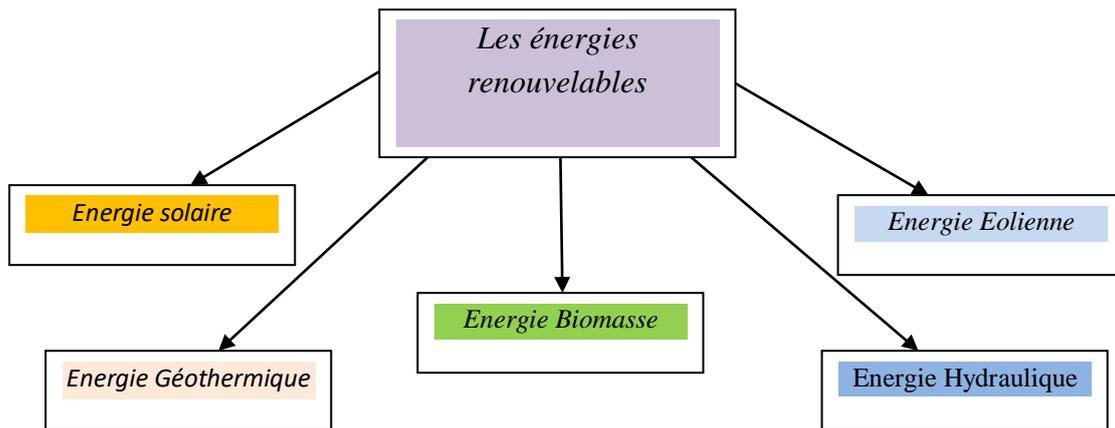
**L'énergie hydraulique :**

- En 1883, l'ingénieur italien Lorenzo Vanossi conçoit et installe à Chiavenna le premier générateur électrique de la province de Sondrio actionné par la force hydraulique.
- En 2015, l'hydroélectricité en Chine prend de très loin 1er rang mondial.

**I.3 Les énergies renouvelables**

L'énergie renouvelable, souvent appelée énergie propre, provient de sources ou de processus naturels qui se renouvellent constamment. Citant par exemple, le rayonnement du soleil et le vent, qui ont des conditions météorologiques.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. Le besoin d'une alternative renouvelable pour faire produire l'électricité a été le sujet de discussion pour plusieurs secteurs et aux niveaux d'un grand nombre de pays au monde entier comme le témoigne plusieurs documents scientifiques [\[15-16-17\]](#).



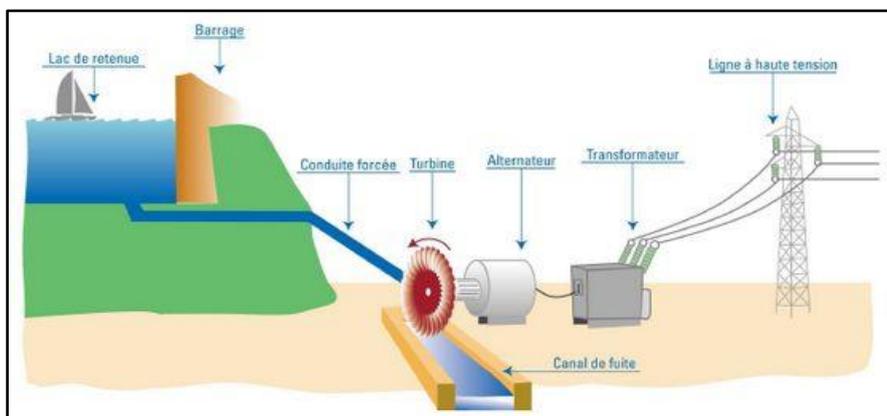
**Figure I.1** Différentes sources d'énergies renouvelables

### I.3.1 Système hydraulique

L'hydroélectricité est la plus grande source d'énergie renouvelable pour l'électricité aux États-Unis [17].

L'hydroélectricité repose sur l'eau en général l'eau qui se déplace rapidement dans une grande rivière ou qui descend rapidement d'un point élevé et convertit ce potentiel en électricité en faisant tourner les pales d'une turbine, ce déplacement va produire un travail mécanique qui est utilisé directement ou converti sous forme d'électricité. Actuellement la hauteur de chute de l'eau apporte un rendement beaucoup plus élevé, grâce à des conduites forcées.

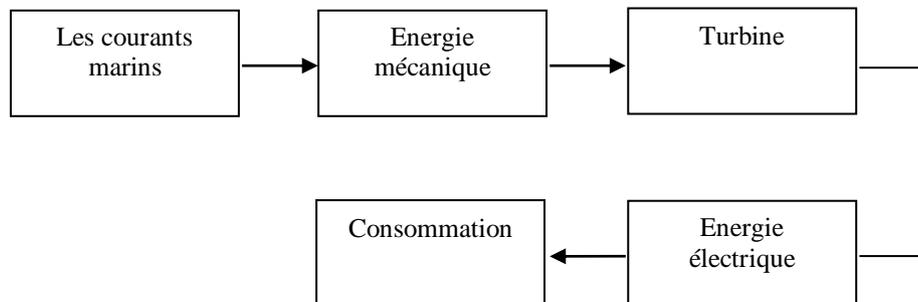
Il existe plusieurs techniques utilisées dans cette énergie telle que [18]: Marémotrice, hydrolienne, barrage.



**Figure I.2** L'énergie Hydraulique [18]

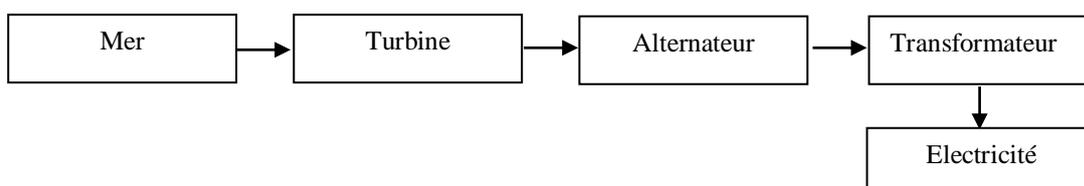
**a) Hydrolienne**

Une autre façon de récupérer l'énergie des marées consiste à placer un capteur mécanique immergé (hydrolienne) en mer de manière à récupérer l'énergie cinétique contenue dans les courants de marées, ces courants marins représentent une énergie fabuleuse.

**Figure I.3** Système Hydrolienne**b) Marémotrice**

L'énergie marémotrice consiste à récupérer l'énergie des courants de marée et de la mer dans une zone à forte amplitude de marée (il est nécessaire que l'amplitude de marée maximale soit supérieure à 5 mètres). C'est en plaçant une infrastructure (barrage) pour retenir l'eau entre la partie supérieure et inférieure de l'estuaire ou d'un bras de la mer, ce qui permet de stocker l'eau de mer grâce à la formation d'un réservoir. L'énergie potentielle associée à la différence de niveau d'eau entre les deux bassins entraînera les turbines lors des phases de remplissage et de vidange, utilisant ainsi le mouvement de ces turbines pour produire de l'électricité.

L'usine marémotrice est une centrale électrique tirant son énergie de la force de la marée.

**Figure I.4** Système Marémotrice

### c) Barrages hydrauliques

Un barrage hydraulique sert à retenir l'eau d'un cours d'eau naturel, créant ainsi un lac d'accumulation. Par sa force de chute, l'eau va entraîner une turbine afin de créer de l'électricité.

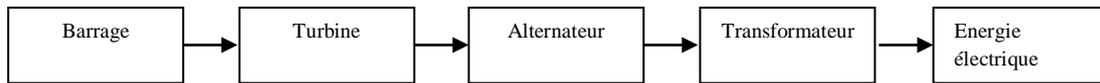


Figure I.5 Barrages Hydraulique

### I.3.2 Système de la biomasse

La biomasse est une matière organique qui provient des plantes et des animaux, et comprend les cultures, les déchets de bois et les arbres [19]. Lorsque la biomasse est brûlée, l'énergie chimique est libérée sous forme de chaleur et peut produire de l'électricité grâce à une turbine à vapeur.

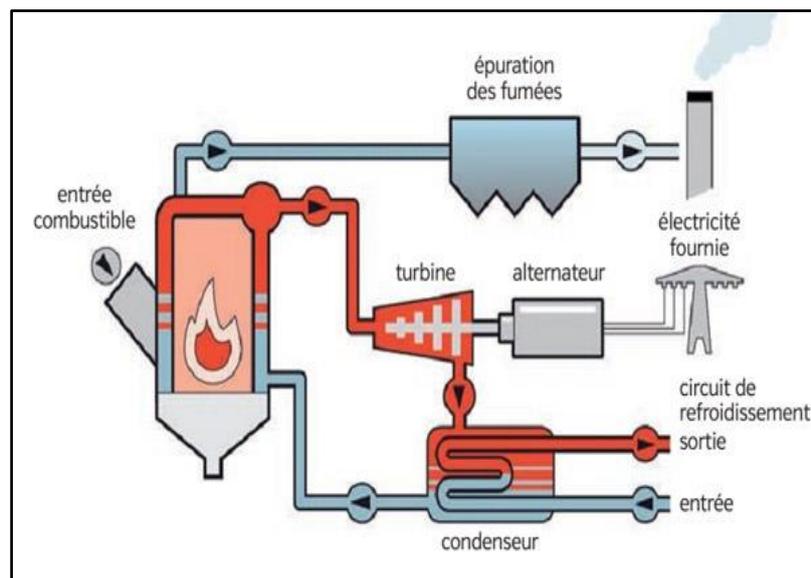


Figure I.6 Système de la biomasse [19]

La figure précédente représente une centrale à biomasse qui produit de l'électricité grâce à l'énergie thermique dégagée par la combustion de déchets végétaux, de déchets ménagers et le biogaz. Le combustible apporte une énergie chimique. Il est amené vers une chaudière, il est introduit dans la chambre de combustion où, en brûlant, il dégage de la chaleur. La chaleur est transportée à des tubes remplis d'eau qui tapissent la chaudière. L'eau

chaude se dirige vers un ballon dans lequel elle se transforme en vapeur. La vapeur alimente une turbine qui fait tourner un alternateur qui produit un courant électrique.

### I.3.3 Système géothermique

La géothermie consiste à capter la chaleur contenue dans la croûte terrestre pour produire du chauffage ou de l'électricité [20]. Actuellement, elle représente une énergie renouvelable en forte extension.

Dans la croûte terrestre il y a des zones stables à faible débit calorifique et des zones instables avec un très grand flux de chaleur. Les deux situations définissent les différents types d'énergie géothermique [21-22] :

- ✓ La géothermie à haute énergie.
- ✓ La géothermie à basse énergie.
- ✓ La géothermie à très basse énergie.

#### a) La géothermie à haute énergie

La température élevée du gisement (entre 80°C et 300°C) permettant la production d'électricité [23].

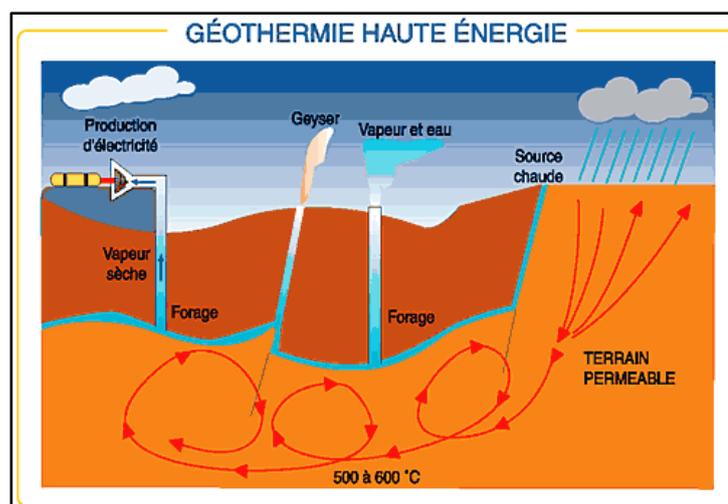


Figure I.7 Géothermie haute énergie [23]

### b) La géothermie à basse énergie

La température de l'eau entre 30°C et 100°C. Cette technologie est utilisée principalement pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur [23].

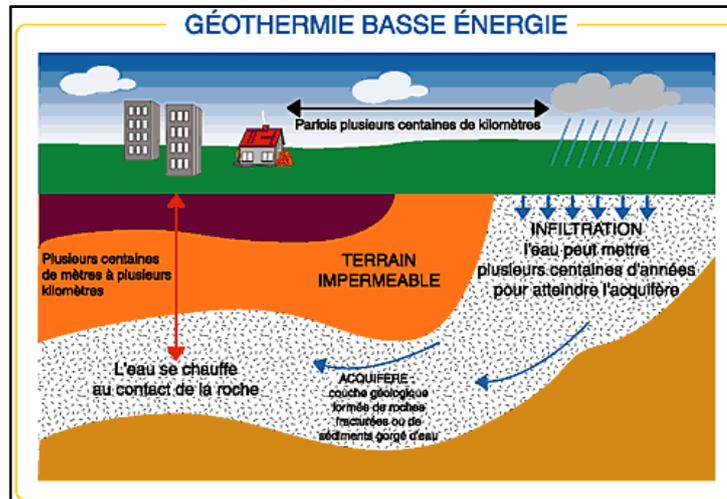


Figure I.8 Géothermie base énergie [23]

### c) La géothermie à très basse énergie

La température est comprise entre 10 °C et 30 °C. Cette technologie est appliquée au chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique [23].

#### I.3.3.1 le principe de fonctionnement de l'énergie géothermique

Le principe est d'extraire l'énergie géothermique présente dans le sol pour une utilisation sous forme de chauffage ou de conversion en électricité. Dans les couches plus profondes, la chaleur de la Terre est produite par la radioactivité naturelle des roches qui composent la croûte terrestre: il s'agit de l'énergie nucléaire produite par la décomposition des matières naturelles, l'uranium, le thorium et le potassium. Cette énergie peut être utilisée soit sous forme d'électricité, soit sous forme de chaleur et chaque type se caractérise par ses multiples technologies et applications, en fonction de la demande et des besoins.

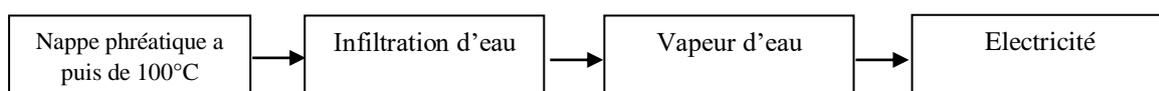


Figure I.9 Système géothermique

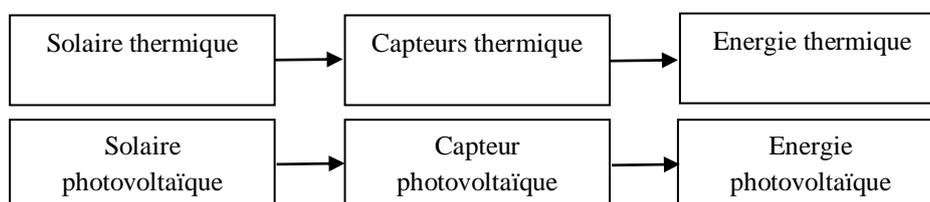
### I.3.4 Système solaire

L'énergie solaire consiste à capturer l'énergie du soleil et à la convertir ensuite en électricité. Nous pouvons ensuite utiliser cette électricité pour éclairer nos maisons, nos rues et nos entreprises, et pour alimenter nos machines également [24]. .

L'énergie du Soleil se présente sous la forme de rayonnement solaire. Le rayonnement solaire rend possible la production d'électricité solaire [25].

La source d'énergie renouvelable la plus abondante est sans aucun doute l'énergie solaire. Le Soleil envoie sur terre une puissance de 90.000 térawatts (TW), à comparer aux 14 TW consommés par la population mondiale, et va continuer à le faire pendant quelques milliards d'années [26]. Cependant, en raison de son caractère intermittent et de sa faible densité, il est capital de pouvoir stocker et concentrer cette énergie solaire sous forme de carburant, il existe deux types d'énergie solaire sont :

- ✓ L'énergie solaire thermique.
- ✓ L'énergie solaire photovoltaïque.



**Figure I.10** Système solaire

#### a) Système solaire thermique

L'énergie solaire thermique est une source d'énergie sans émission. Elle est basée sur la température qui permet essentiellement de faire chauffer l'eau afin de produire une pression mesurable, on l'appelle aussi la production combinée de chauffage par plancher chauffant [27].

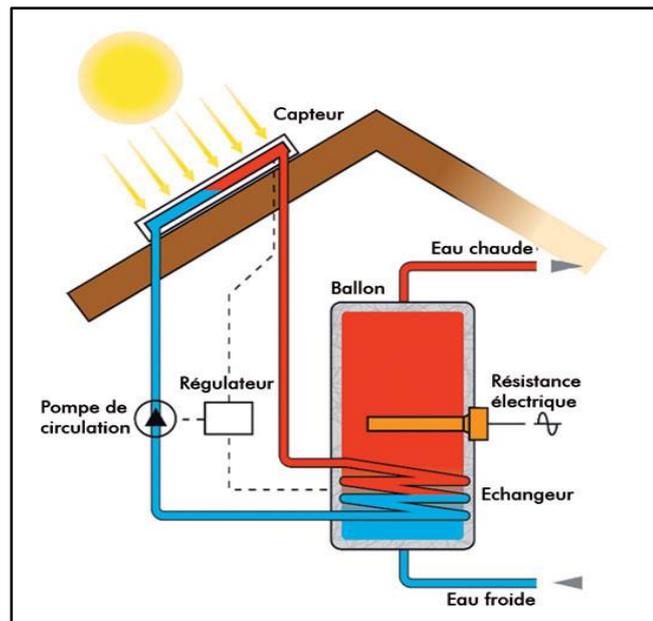


Figure I.11 Système solaire thermique [27]

### b) l'énergie solaire photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés "semi-conducteurs" (le plus connu est le silicium utilisé pour les composants électroniques).

L'énergie solaire photovoltaïque dépend de l'effet photoélectrique. Cela permet de créer un courant électrique direct à partir du rayonnement électromagnétique grâce aux panneaux solaires. Par conséquent, cette ressource se caractérise par son inépuisable et peut être utilisée n'importe où dans la région. Nous pouvons également stocker cette énergie à l'aide des batteries pour une utilisation en cas de besoin.

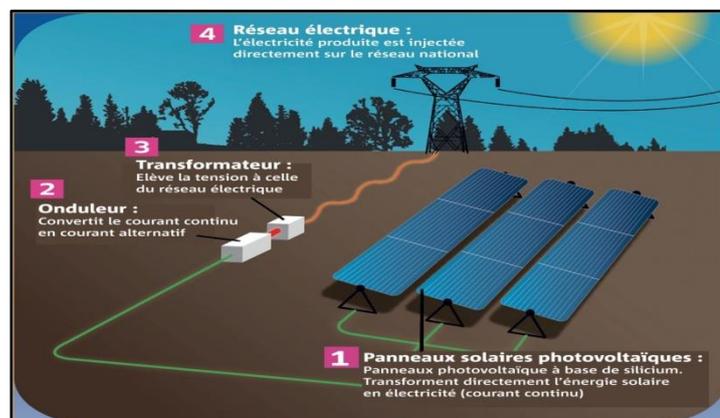


Figure I.12 Système solaire photovoltaïque [27]

### I.3.4.1 La conversion de la lumière en électricité

Le terme "cellules PV" est souvent abrégé par l'abréviation "PV", du mot "photo" qui est un mot grec signifiant lumière et "Volta" le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la cellule électrochimique en 1800. Ainsi, le phénomène photoélectrique est la conversion directe de l'énergie du solaire à l'électricité [28].

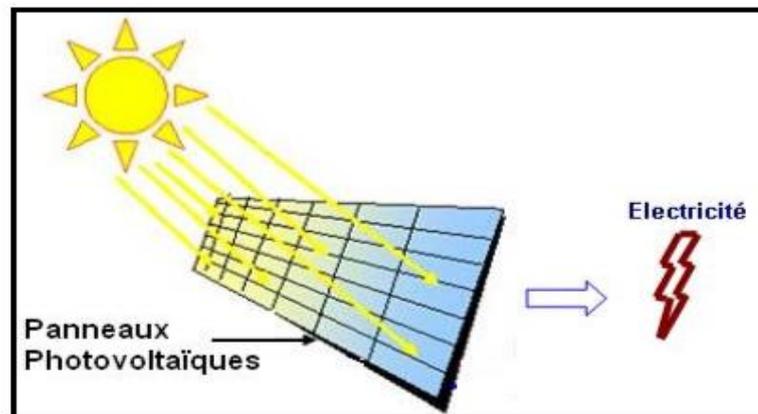


Figure I.13 Conversion de l'énergie solaire en électricité [28]

### I.3.4.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

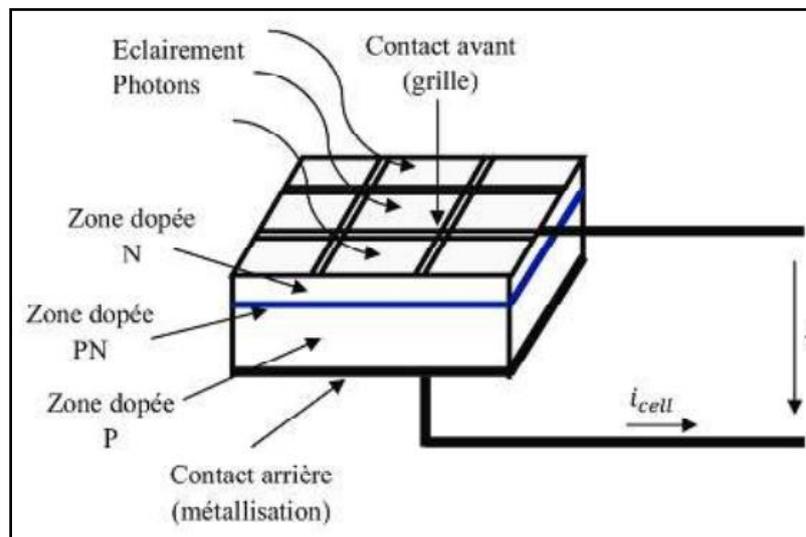
Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de convertir l'énergie solaire en énergie électrique. Cette conversion est basée sur les trois mécanismes suivants :

- ✓ L'absorption des photons par le matériau formant l'appareil est souvent du silicium;
- ✓ Convertir l'énergie photonique en énergie électrique correspondant à Créer des paires d'électrons / trous dans le matériau semi-conducteur;
- ✓ Collecte des particules générées dans le dispositif.

Par conséquent, le matériau qui compose la cellule photovoltaïque doit contenir deux niveaux d'énergie et être suffisamment connecté pour permettre la circulation et la distribution du courant, et donc l'intérêt du semi-conducteur pour la fabrication des cellules photovoltaïques.

Aux fins de la collecte des particules générées, un champ électrique est nécessaire pour permettre la séparation des paires électrons / trou créées. Par conséquent, la jonction PN est

souvent utilisée. D'autres structures peuvent également être, telles que des joints hétérogènes et Schottky utilisé [29].



**Figure I.14** Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [29]

### I.3.4.3 Technologie des cellules solaire

Le silicium est l'un des matériaux les plus courants sur Terre connu sous le nom de sable, mais avec un haut degré de pureté est nécessaire pour en faire une cellule optique et un processus coûteux. Selon les techniques connues utilisées, il existe du silicium monocristallin avec un rendement de 16 à 18%, du silicium poly-cristallin avec un rendement de 13 à 15% et un silicium amorphe avec une efficacité de 5 à 10%. D'autres substances telles que l'arséniure de gallium et le tellure de cadmium testé en laboratoire ont une productivité (38%).

### I.3.4.4 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

#### Les avantages

- ✓ Énergie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
- ✓ L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non polluante et respectueuse de l'environnement.
- ✓ Génère l'énergie requise.
- ✓ Aucun bruit.

- ✓ L'extension des systèmes est facile, et la taille de la l'installation peut également être augmentée plus tard pour répondre aux exigences de charge.

### Les inconvénients

- ✓ Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- ✓ Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.
- ✓ La fabrication de panneaux photovoltaïques est une technologie de très haute technologie qui les oblige à demander beaucoup de recherche et développement et donc des investissements coûteux.

### I.3.5 Système éolienne

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable produite par des machines qui utilisent le vent comme source d'énergie [30].

Cette énergie est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Cette hélice est montée sur un arbre qui est relié à des systèmes mécaniques qui servent à moulinier le grain ou à pomper de l'eau, soit à un générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique [31].

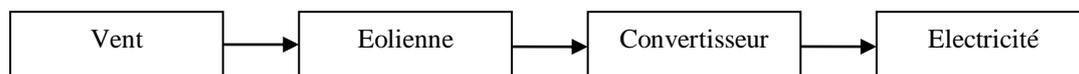
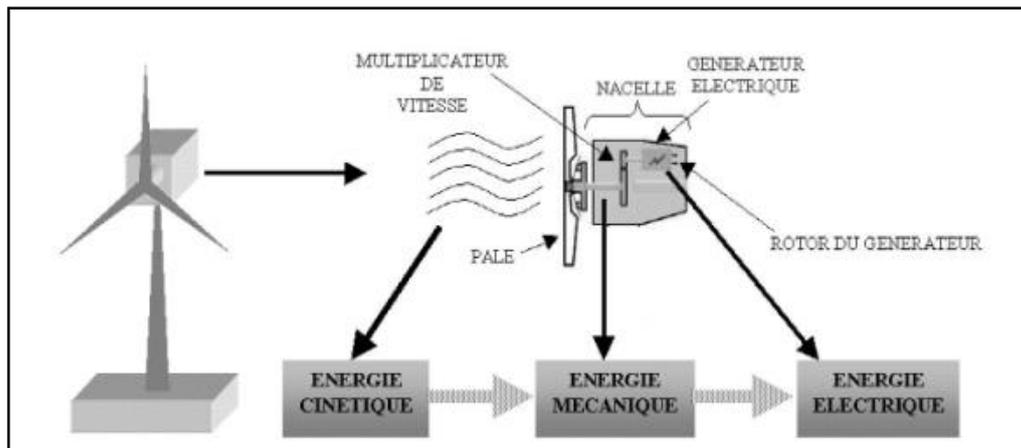


Figure I.15 Système éolien

#### I.3.5.1 Principe de la conversion de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelée éolienne, est un appareil capable de convertir l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transport pour convertir ce dernier en énergie électrique via un générateur (Fig I.14).



**Figure I.16** Conversion de l'énergie cinétique du vent [31]

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (mât, pales et multiples notamment) doivent être technologiquement avancés et donc on peut dire qu'ils sont très chers. L'énergie éolienne est l'une des nouvelles façons de produire de l'électricité décentralisée qui est une alternative viable à l'énergie nucléaire sans prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite est beaucoup plus faible).

Les installations peuvent être mises en place à terre, notamment sur de grandes surfaces, mais aussi de plus en plus en mer (parcs éoliens offshore) où la présence des vents est plus forte et plus uniforme. De plus, les éoliennes sont moins visibles et causent moins de pollution sonore.

### **I.3.5.2 Principaux composants d'une éolienne**

Il existe de nombreuses configurations possibles d'éoliennes qui peuvent présenter des différences importantes en raison de leurs multiples types. Cependant, l'éolienne "classique" est généralement composée de trois composants principaux.

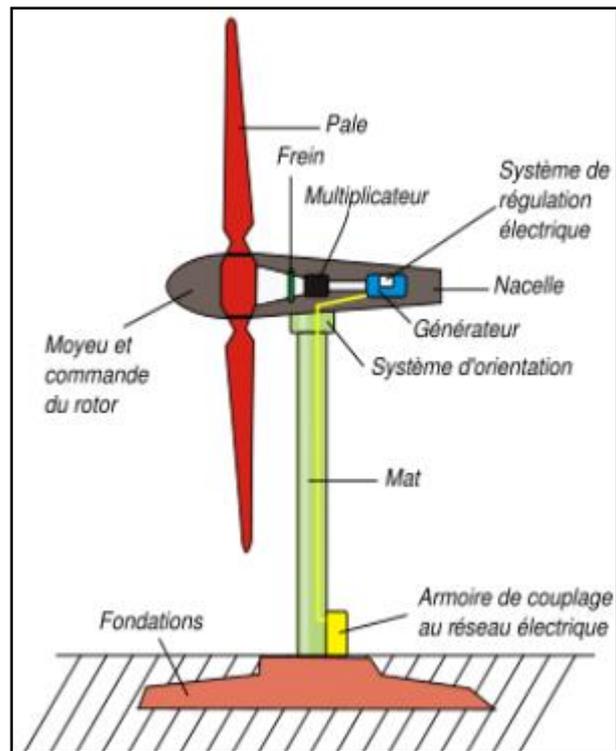


Figure I.17 Structure générale d'une éolienne [31]

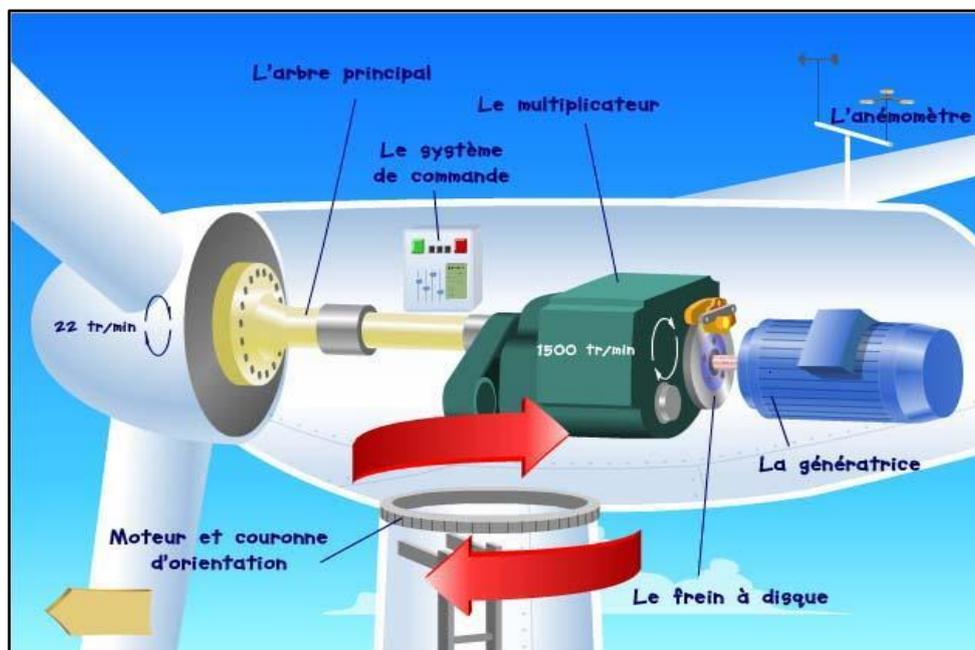


Figure I.18 Vue éclatée d'une aéro-générateur [31]

- Le mât, souvent un tube en acier ou un treillis métallique, doit être aussi haut que possible pour éviter les perturbations près du sol. Ainsi, la quantité de matériaux utilisés est un coût important et le poids doit être limité. (Exemple: éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre 90 m, hauteur mât 80 m).
- La nacelle est constituée de tous les éléments mécaniques permettant de connecter l'éolienne au générateur: arbres lents et rapides, roulements, multiples. Freins à disque, différents des freins aérodynamiques, qui arrêtent automatiquement le système en cas de surcharge. Le générateur est généralement une machine synchrone ou asynchrone et des systèmes hydrauliques ou électriques pour guider les pales (freins pneumatiques) et les convoyeurs (nécessaires pour maintenir la zone où le générateur d'air dépasse perpendiculairement à la direction du vent).
- Le rotor, qui se compose des pales collectées en son centre. Pour les éoliennes dédiées à la production d'électricité, le rotor à trois pales (le concept danois) est le plus populaire car il se caractérise par un bon compromis entre coût, comportement vibratoire, pollution visuelle et bruit.
- Les rotors à vitesse fixe sont configurés avec un système de guidage des pales qui permet de faciliter le fonctionnement du générateur (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) à proximité de la synchronisation et qu'il est directement connecté à la force électronique de précision.
- Les rotors à vitesse variable sont souvent moins chers car le dispositif d'orientation des pales est simplifié. Cependant, une interface électrique électronique est nécessaire entre le générateur et le réseau ou la charge.
- Les pales sont principalement caractérisées par leur ingénierie fiable en performances aérodynamiques et les matériaux qu'elles fabriquent (actuellement, les matériaux composites tels que les fibres de verre et les dernières fibres de carbone sont très utiles.

Les moteurs éoliens utilisés pour capter l'énergie du vent peuvent être classés en deux catégories distinctes :

- Les machines à axe horizontal.
- Les machines à axe vertical.



(A)



(B)

**Figure I.19** : Eolienne à axe horizontal (A) ; Eolienne à axe vertical (B)

### I.3.5.3 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne

Le développement de l'énergie éolienne est clairement lié aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. De plus, cette source d'énergie présente des défauts qui doivent être étudiés, afin qu'elle ne devienne pas un obstacle à son développement et à sa croissance.

#### Les avantages

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie respectueuse de l'environnement
- ✓ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un processus continu car les éoliennes en fonctionnement peuvent être arrêtées facilement, contrairement aux opérations continues de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- ✓ Les parcs éoliens peuvent être enlevés très facilement et ne laisser aucune trace.
- ✓ Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement car l'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.
- ✓ L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

#### Les inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- ✓ Le bruit : notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- ✓ L'impact visuel. Ça reste un thème subjectif.

- ✓ Impact sur les oiseaux: Certaines études indiquent que les parcs éoliens ne devraient pas installer dans les voies de migration des oiseaux, de sorte qu'ils ne sont pas suspendus et tués par les éoliennes.
- ✓ La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant aléatoire, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.

## I.4 Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie

Le potentiel d'énergie renouvelable en Algérie est le plus important d'Afrique du Nord. Le marché des énergies renouvelables est prometteur et la promotion des énergies renouvelables est l'un des piliers de la politique énergétique et environnementale du pays. Parmi les objectifs que les pouvoirs publics cherchent à se fixer, le marché local doit atteindre 500 mégawatts en 2010, portant l'électricité produite à partir d'énergies renouvelables à 5% de l'électricité totale produite [32].

### I.4.1 Potentiel solaire

En raison de son emplacement stratégique, l'Algérie possède le plus grand dépôt d'énergie solaire du bassin méditerranéen. La durée moyenne de l'ensoleillement sur le territoire algérien dépasse 2 000 heures par an et atteint environ 3 500 heures d'ensoleillement dans le Grand Désert d'Algérie. L'énergie totale reçue est estimée à 169 400 TWh /an, soit 5000 fois la consommation annuelle d'électricité du pays [32].

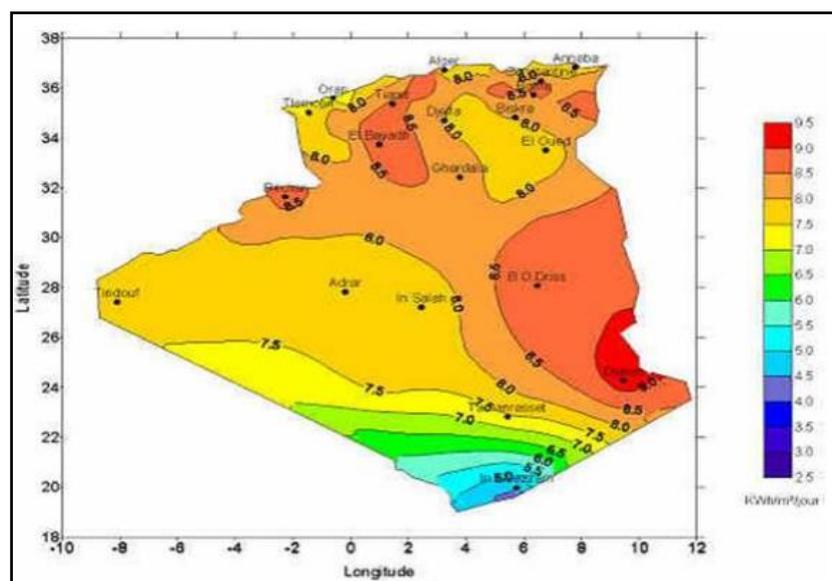


Figure I.20 Carte de l'irradiation en Algérie (mois de juillet) [32]

### I.4.2 Potentiel éolien

Les potentiels de vent divergent selon la situation géographique. Ainsi, dans le nord de l'Algérie, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne modérée du vent (1 à 4/ s) avec de petits climats autour des villes d'Oran, Annaba, dans les hauts plateaux et également à Biskra. Ce potentiel énergétique est bien adapté au pompage de l'eau, notamment en altitude. Au sud, la vitesse moyenne du vent dépasse les 4m/s, plus particulièrement au sud-ouest, avec des vents qui dépassent les 6m/s dans la région d'Adrar [32].

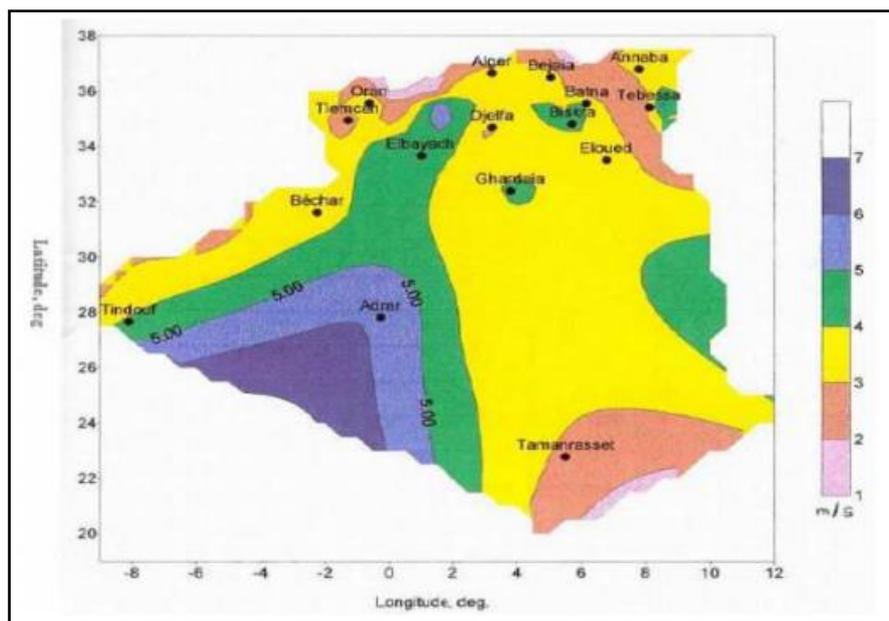


Figure I.21 Carte des vents en Algérie [32]

### I.4.3 Les énergies géothermiques, issues de la biomasse et hydraulique

Plus de 200 sources d'eau chaude ont été répertoriées dans le nord est et le nord ouest de l'Algérie. Environ 33% d'entre elles ont des températures supérieures à 45°, la plus chaudes étant située à Biskra (118°). Plus au sud, délimité par Biskra au nord, In Salah au sud et Adrar à l'ouest, la nappe albienne constitue une zone de plusieurs milliers de km, caractérisée par une eau à température moyenne de 57°. L'ensemble du débit d'exploitation des sources et de cette nappe représente une puissance estimée à 700MW/an.

Le potentiel de biomasse est divisé entre les déchets humains, les déchets urbains et agricoles non recyclés, estimés à 1,33 tonne par an (tonnes d'équivalent pétrole) et l'énergie du bois issu des forêts [32]. Ce dernier représente 37 tonnes par an et la récupérabilité est de 3,7 tonnes par an.

La part de l'énergie hydraulique dans la production nationale d'électricité algérienne reste faible (1,7% de la production installée), en raison du nombre insuffisant de sites et de l'exploitation limitée des sites existants.

## **I.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons fait une présentation des systèmes d'énergies renouvelables les plus utilisées. En plus, nous avons acquis beaucoup de savoir sur l'historique, la technologie et le fonctionnement des énergies renouvelables.

Enfin, nous avons conclu de ce passage que la production de l'énergie électrique par les énergies renouvelables est devenue dans cette dernière décennie une occupation internationale.

# **Chapitre II**

## **Les micros-réseaux électriques (micros-grids)**

## II.1 Introduction

En raison de plusieurs problèmes que rencontrent les réseaux électriques actuels (la pollution environnementale ainsi que le réchauffement climatique, l'augmentation de la consommation, la faible efficacité énergétique, la raréfaction du pétrole, etc.). On a développé une nouvelle tendance, appelée la production décentralisée. Cette production utilise des sources d'énergie renouvelable, c'est à dire que l'émission de  $CO_2$  de ces moyens de production est presque nulle.

Malheureusement, l'utilisation de la production décentralisée peut causer autant de problème que des solutions. Une meilleure façon d'utiliser le potentiel énergétique de la production distribuée est de faire une approche qui permet de contrôler localement des générateurs et aussi des consommateurs dans un sous-réseau. Ces sous-réseaux peuvent être dénommés micro-réseau ou micro-grid.

Fondamentalement, les micros-grids appelés aussi micro-réseaux intelligents ou mini smart grids, les micros grids sont des réseaux électriques de petite taille, conçus pour fournir une alimentation électrique fiable et de meilleure qualité à un petit nombre de consommateurs [33-34]. Il regroupe plusieurs sites de production locaux et dispersés (piles à combustible, micro-turbines, panneaux photovoltaïques, petits générateurs diesel, petite hydraulique, mini-éoliennes), Ils peuvent être raccordés directement au réseau de distribution.

Dans ce deuxième chapitre, nous allons présenter le micro-réseau. Premièrement, nous donnerons une définition de celui-ci ainsi que ses avantages et ses inconvénients. Puis, nous détaillerons le micro-réseau ainsi que ces technologies.

## II.2 Historique

- En 1980, la lecture automatique des compteurs est une première étape dans l'émergence des micros-réseaux.
- En 1990, les micros-réseaux sont évoluent vers le principe de compteur communicant, qui renseigne sur la variation de consommation électrique au cours de la journée.
- En 2000, le projet italien Telegestore est le premier exemple de micro réseau.
- En 2005, les réseaux intelligents ce développe progressivement ainsi ils généralisent avec la mise en place par la commission européennes de la plate forme technologique « Smartgrids ».

### II.3 Le micro-réseau

Il n'existe pas de définition globale du réseau intelligent [35]. La plate-forme technologique européenne des réseaux intelligents a donnée la définition suivante : " les réseaux électriques capables d'intégrer intelligemment les comportements et les actions de tous les utilisateurs qui y sont connectés les producteurs, les consommateurs et ceux qui font les deux Afin de fournir efficacement des approvisionnements durables, économiques et sûrs en électricité" [36]. La commission électrotechnique internationale donne sa définition comme suit : "Le réseau intelligent est le concept de la modernisation du réseau électrique " [37]. Les réseaux intelligents ont également été définis en termes d'une plus large gamme de fonctionnalités et de fonctions environnementaux, sociaux et économiques.

Les micros-réseaux se composent de plusieurs charges connectées, des installations de production décentralisées qui sont généralement basés sur des ressources énergétiques renouvelables, stockage ainsi que des outils de supervision et de gestion de la demande. Peut être lié au réseau principal car il peut fonctionner seul.

IEEE P2030 définit également les micro-réseaux comme «système de systèmes» (SoS), parce que le réseau intelligent est un système complexe composé de systèmes inter reliés [38].

De manière générale, les définitions employées pour désigner la technologie de réseau intelligent sous-estimé en fonction des politiques et des industries, mais elles se rejoignent sur l'utilisation élargie de technologies digitales, moyens de communication et systèmes de contrôle à distance appliqués tant aux réseaux électriques basse tension qu'auprès des sites de consommation avec équipements de comptage intelligent.

L'objectif principal du développement des réseaux électriques est l'accès de l'équilibre entre la production et la consommation qui rend le système plus stable [39-40-41-42].

### II.4 Evolution du système électrique et l'émergence du concept de smart grids

Les technologies de réseaux intelligents sont l'un des moyens de répondre aux contraintes du secteur de l'électricité et sont: la nécessité de rénover l'infrastructure réseau, une augmentation de la demande électrique, une volonté d'accroître les moyens de production décentralisée et/ou intermittente [43], grâce à laquelle peut être développé un système électrique plus intelligent, par les technologies de micro-réseau.

### II.4.1 Une demande croissante

La consommation mondiale d'électricité en 2013 est de 21 538 TWh. Elle a été triplé durant les 40 ans voir figure (II.1). De plus, toute pénurie doit être compensée par une augmentation des ressources électriques, notamment une pénurie de pétrole pendant environ 20 ans [44], et l'émergence de nouvelles technologies telles que l'accès massif aux voitures électriques. En effet, il est difficile de garantir un approvisionnement stable en électricité aux consommateurs car le problème des énergies renouvelables est son travail intermittent qui dépend des conditions climatiques et de la météorologie en plus de la difficulté de contrôler le réseau électrique car il dépend des anciennes infrastructures et des pertes d'énergie pendant le transport. Et enfin, nous devons réduire les émissions de gaz à effet de serre, améliorer le réchauffement climatique, améliorer l'intégration des énergies renouvelables, réduire la consommation d'énergie, et tout cela grâce aux réseaux intelligents, car ils sont capables de connaître l'état du système et de le gérer efficacement.



Figure II.1 Evolution de la consommation mondiale

### II.4.2 Le coût d'énergie

L'obstacle le plus évident et le plus largement médiatisé aux énergies renouvelables est le coût spécifique, les coûts d'investissement, ou la dépense initiale pour la construction et l'installation de parcs solaires et éoliens. Comme la plupart des énergies renouvelables, le solaire et l'éolien sont extrêmement bon marché - leur "carburant" est gratuit et leur maintenance est minimale - de sorte que la majeure partie des dépenses provient de la mise en place de la technologie.

Pour compenser, de nouvelles sources d'énergie ont été développées, mais celles-ci ont un prix de production plus élevé. Il va donc falloir trouver de nouveaux comportements sur marché pour réduire cette augmentation de tarif afin que l'énergie puisse encore être accessible au plus grand nombre sur les factures des consommateurs [45].

## II.5 Avantages et les inconvénients des réseaux intelligents

Les avantages du réseau intelligent sont:

- Amélioration de la capacité et de l'efficacité des réseaux électriques existants;
- Amélioration de la fiabilité et de la qualité de la puissance;
- Améliorer la résistance aux perturbations;
- Faciliter le déploiement élargi des sources d'énergie renouvelables;
- Automatisation de la maintenance et de l'exploitation;
- Présenter les opportunités d'améliorer la sécurité du réseau;
- Augmenter le choix du consommateur;
- Permettre de nouveaux produits, services et marchés.

Les inconvénients du réseau intelligent sont :

- Difficultés techniques liés au manque d'expérience technique ;
- Coûts élevés des installations ainsi que des ressources énergétiques décentralisées ;
- Absence de lois ou règlement standard pour réguler le fonctionnement des micro-réseaux

## II.6 Le principe de fonctionnement d'un micro-réseau

Pour comprendre le fonctionnement d'un micro-réseau, il faut d'abord comprendre le fonctionnement de réseau.

### II.6.1 Le fonctionnement de micro-réseau

Le réseau relie les maisons, les entreprises et les autres bâtiments à des sources d'énergie centrales, qui nous permettent d'utiliser des appareils, des systèmes de chauffage/climatisation et de l'électronique. Mais cette interconnexion signifie que lorsqu'une partie du réseau doit être réparée, tout le monde est concerné.

C'est là qu'un micro-réseau peut aider. Un micro-réseau fonctionne généralement lorsqu'il est connecté au réseau, mais il peut surtout se couper et fonctionner de manière

autonome en utilisant la production d'énergie locale en période de crise, comme les tempêtes ou les pannes de courant, ou pour d'autres raisons.

Un micro-réseau peut être alimenté par des générateurs distribués, des batteries et/ou des ressources renouvelables comme des panneaux solaires. Selon la façon dont il est alimenté et dont ses besoins sont gérés, un micro-réseau peut fonctionner indéfiniment.

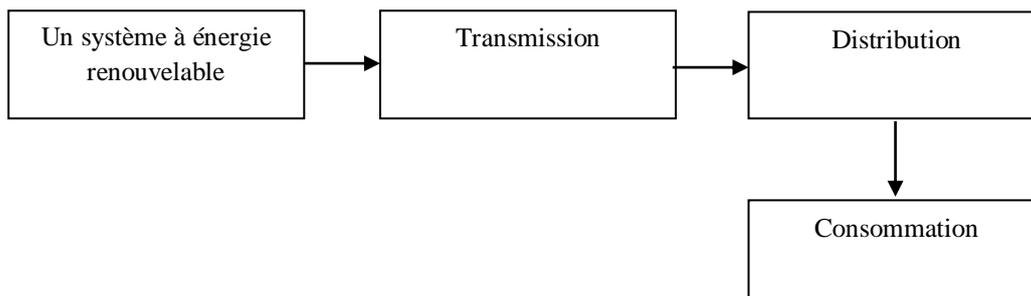
## **II.6.2 La connexion de micro-réseau avec le réseau**

Un micro-réseau se connecte au réseau en un point de couplage commun qui maintient la tension au même niveau que le réseau principal, à moins qu'il n'y ait un problème quelconque sur le réseau ou une autre raison de se déconnecter. Un interrupteur peut séparer le micro-réseau du réseau principal automatiquement ou manuellement.

Un micro-réseau ne fournit pas seulement un secours au réseau en cas d'urgence, mais peut également être utilisé pour réduire les coûts ou se connecter à une ressource locale trop petite ou peu fiable pour une utilisation traditionnelle du réseau. Un micro-réseau permet aux communautés d'être plus indépendantes sur le plan énergétique et, dans certains cas, plus respectueuses de l'environnement.

Un réseau intelligent associe l'infrastructure électrique aux technologies numériques qui analysent et transmettent l'information reçue. Ces technologies sont utilisées à tous les niveaux du réseau : production, transport, distribution et consommation. Pour fonctionner, les micro-réseaux doivent comporter trois éléments essentiels [46]:

- Une installation de production d'énergie locale pour assurer son autonomie en cas de déconnexion du réseau public (panneaux photovoltaïques, éoliennes, cogénération, pompe à chaleur, centrale biomasse, turbine hydro-électrique) et, en plus, un système de production de secours (groupe électrogène);
- Un système de stockage : batteries, réserve d'eau pour pompage-turbinage et dans l'avenir, super condensateurs et stockage chimique de chaleur latente ;
- Un système de gestion intelligente pour assurer l'équilibre constant entre production et demande d'électricité.



**Figure II.2** Le principe de fonctionnement d'un micro réseau

## II.7 Architecture des micros-réseaux

La figure (II.3) ci-dessous présente l'architecture du micro-réseau avec les systèmes associés et les sous-systèmes. L'architecture globale du micro-réseau est divisée en trois grands systèmes: Système d'infrastructure intelligente, un système de gestion intelligent et un système de protection intelligent.

### II.7.1 Infrastructure des systèmes intelligents

Les systèmes intelligents sont basés sur des informations infrastructure de communications et l'infrastructure d'énergie qui prend en charge le réseau intelligent:

- Production, livraison et consommation d'électricité avancées;
- Comptage, surveillance et management avancées de l'information;
- Technologies de communication avancées.

Le système d'infrastructure intelligente a été divisé en trois sous-systèmes: Sous-système intelligent d'énergie, Système intelligent d'information, et le sous-système intelligent de communication.

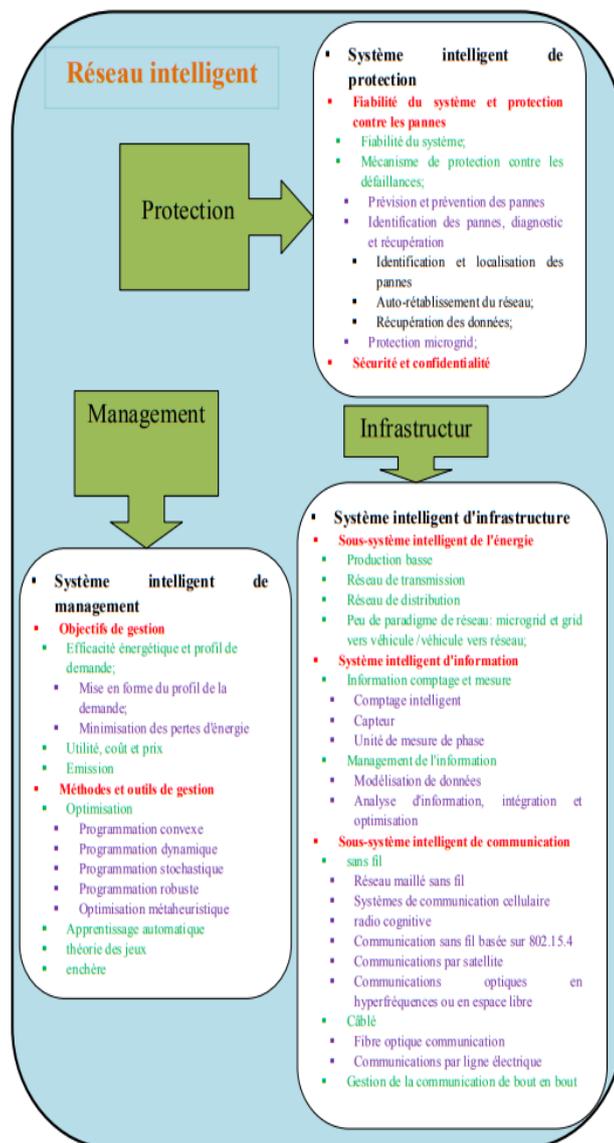
### II.7.2 Système intelligent de management

Le système intelligent de management est fournit des services avancés de management et de contrôle, ce système pourrait être divisé en deux sous-systèmes: les objectifs de management, les méthodes et les outils de management.

### II.7.3 Système intelligent de protection

Le système intelligent de protection est fournit une analyse avancée de la fiabilité du réseau, protection contre les défaillances et les services de protection de la vie privée, ce

système pourrait être divisé en deux sous-systèmes: la fiabilité du système, la protection contre les pannes et la sécurité personnelle.



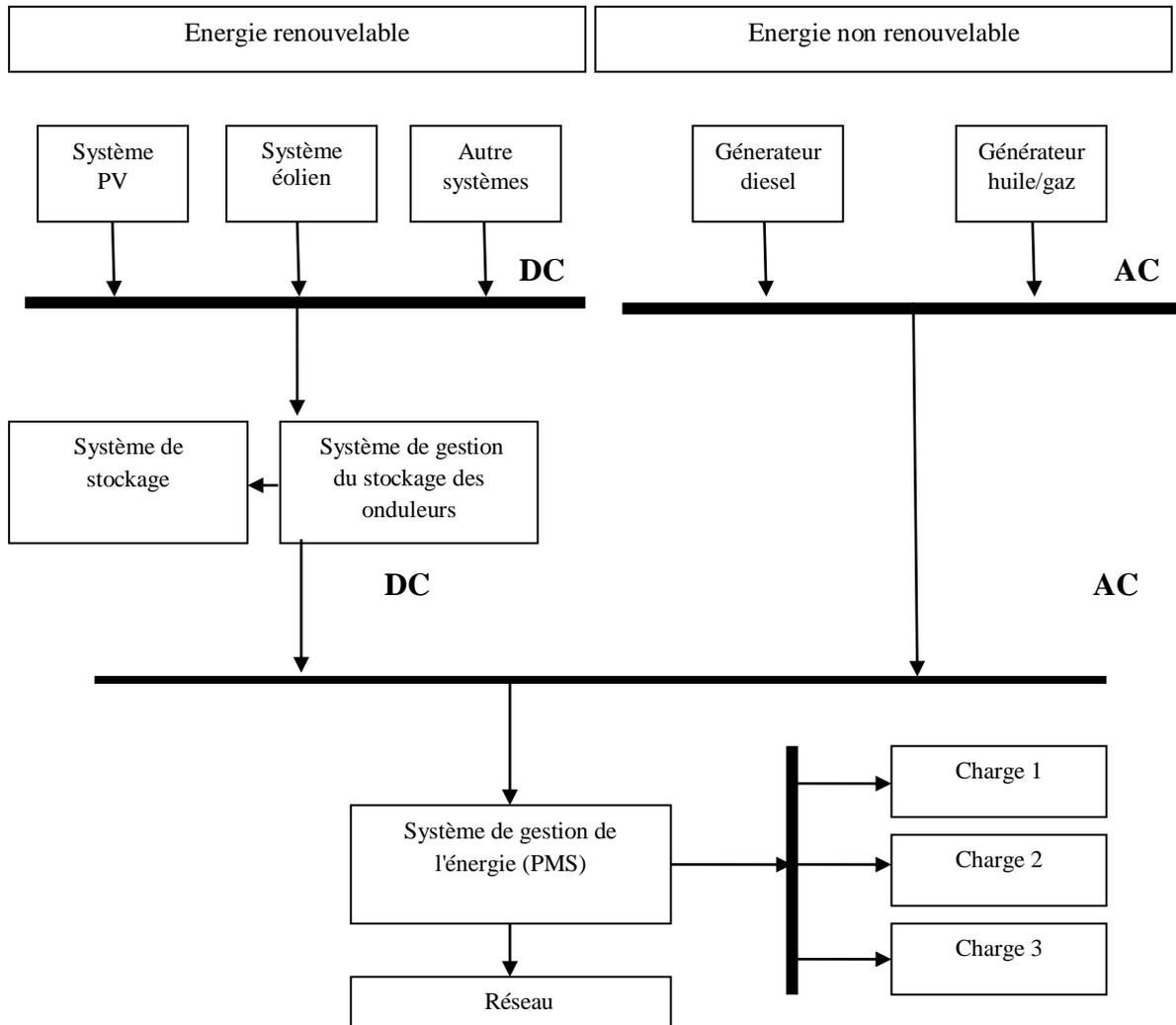
**Figure II.3** Architecture du réseau intelligent avec des systèmes et sous-systèmes associé [47]

## II.8. Structure d'un micro-réseau

La structure du micro-réseau suppose une agrégation de charges et de micro sources fonctionnant comme un système unique fournissant à la fois de l'électricité et de la chaleur.

La majorité des micros sources sont basées sur l'électronique de puissance afin de fournir la flexibilité nécessaire pour assurer un fonctionnement contrôlé comme un système agrégé unique. Cette souplesse de contrôle permet de relier le micro-réseau au réseau

électrique en tant qu'unité contrôlée unique, de disposer d'une simplicité de branchement pour chaque micro-source et de répondre aux besoins locaux du client, ces besoins comprennent une fiabilité et une sécurité locales accrues. La figure ci-dessous présente une structure générale d'un micro-réseau :



**Figure II.4** Structure générale d'un micro-réseau

## II.9 Configuration d'un micro-réseau

Les micro-réseaux sont destinés à alimenter des charges électriques pour une petite Communauté tel que les sites industriels, les sites commerciaux, les villages et les cités universitaire etc....

Les générateurs ou micro-source employés dans un micro-réseau sont généralement renouvelables. Ils englobent un large éventail de technologies telles que : les panneaux photovoltaïques, la biomasse ou encore l'énergie éolienne et l'énergie solaire.

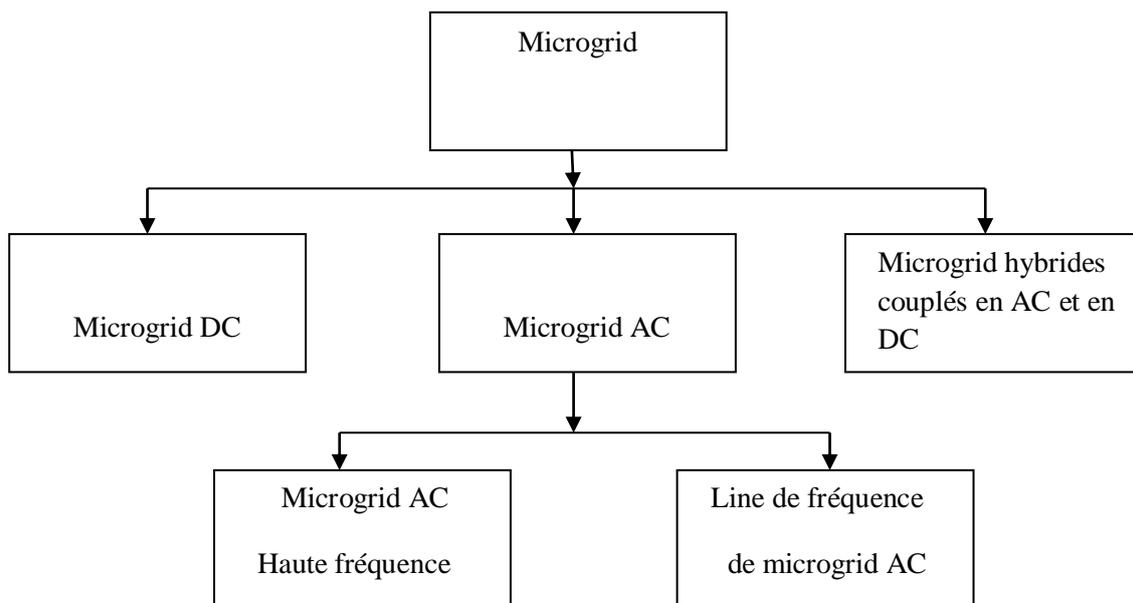
Les micro-réseaux peuvent fonctionner en deux modes : autonome et raccordé au réseau.

- En mode autonome, ils utilisent comme une solution pour alimenter en énergie électrique les sites isolés.
- En mode raccordé au réseau, ils sont normalement connectés au réseau principal de distribution, mais sont capables de s'isoler de ce dernier en cas de perturbation dans le réseau principal.

## II.10 Classification de micro-réseau

Une configuration générale de micro-réseau est illustrée dans la figure (II.5), un micro-réseau se compose d'un commutateur de transfert statique (STS), de charges critiques réparties, de charges non critiques et de plusieurs unités DER avec diverses interfaces électroniques de puissance. Les micro-réseaux sont classés en trois types en fonction du type d'alimentation et de leur emplacement.

- (i) les micro-réseaux d'interface de services publics.
- (ii) les micro-réseaux commerciaux et industriels.
- (iii) les micro-réseaux distants.



**Figure II.5** Classification de micro-réseau

## II.11 Caractéristique d'un micro-réseau

Les réseaux électriques mondiaux font face à de nombreux défis, parmi eux infrastructures vieillissantes, augmentation continue de la demande, augmenter le nombre de sources variables d'énergie renouvelable, et la nécessité d'améliorer la sécurité d'approvisionnement et de réduire les émissions de dioxyde de carbone. La technologie de micro-réseau permet non seulement de répondre à ces défis, mais pour les rendre plus abordables et durables. Les réseaux intelligents peuvent être définis selon quatre caractéristiques en matière de :

- **Fiabilité** : ils améliorent la sécurité et l'efficacité des réseaux ;
- **Flexibilité** : il permet une gestion plus précise de l'équilibre entre production et consommation ;
- **Accessibilité** : il renforce la force de l'intégration des énergies renouvelables sur le réseau ;
- **Economie** : il permet de réaliser des économies d'énergie et de réduire les coûts pour une meilleure gestion du système, (production et consommation).

## II.12 Comparaison entre le réseau électrique traditionnel et le réseau électrique intelligent

Les réseaux du futur seront donc différents des réseaux actuels par leur aspect, leur Fonctionnement, leurs missions et leur déploiement. Le tableau suivant illustre ces différences [\[48\]](#) :

Caractéristiques des réseaux électriques actuels	Caractéristiques des réseaux électriques intelligents
Analogique	Numérique
Unidirectionnel	Bidirectionnel
Production centralisée	Production décentralisée
Communicant sur une partie du réseau	Communicant sur l'ensemble du réseau
Un seul acteur économique	Choix du fournisseur
Gestion de l'équilibre du système électrique par l'offre / production	Gestion de l'équilibre du système électrique par la demande / consommation

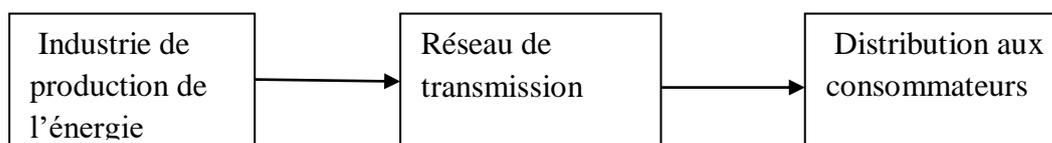
**Tableau II.1** Comparaison entre le réseau électrique traditionnel et intelligent [49]

Comme ils existent aussi trois catégories de différences principales dans les fonctions du réseau classique et les réseaux intelligents, qui sont [50]:

1. Flux d'énergie
2. Flux de données
3. Mix de production

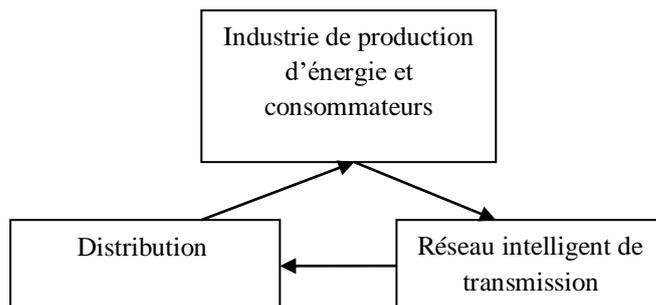
### II.12.1 Flux d'énergie

La figure (II.6) indique le flux d'énergie du réseau existant. L'énergie circule dans un sens, des installations de production, par les lignes de transmission de réseau et, finalement, par les lignes de distribution aux consommateurs.



**Figure II.6** Flux d'énergie du réseau existant

La figure (II.7) indique le flux d'énergie du réseau intelligent. Les technologies de réseau intelligent permettent à l'énergie de circuler dans une boucle. Les consommateurs ont la possibilité de rejoindre les fournisseurs d'énergie dans un rôle accru en consommateurs / générateurs d'énergie.



**Figure II.7** Flux énergétique du réseau intelligent

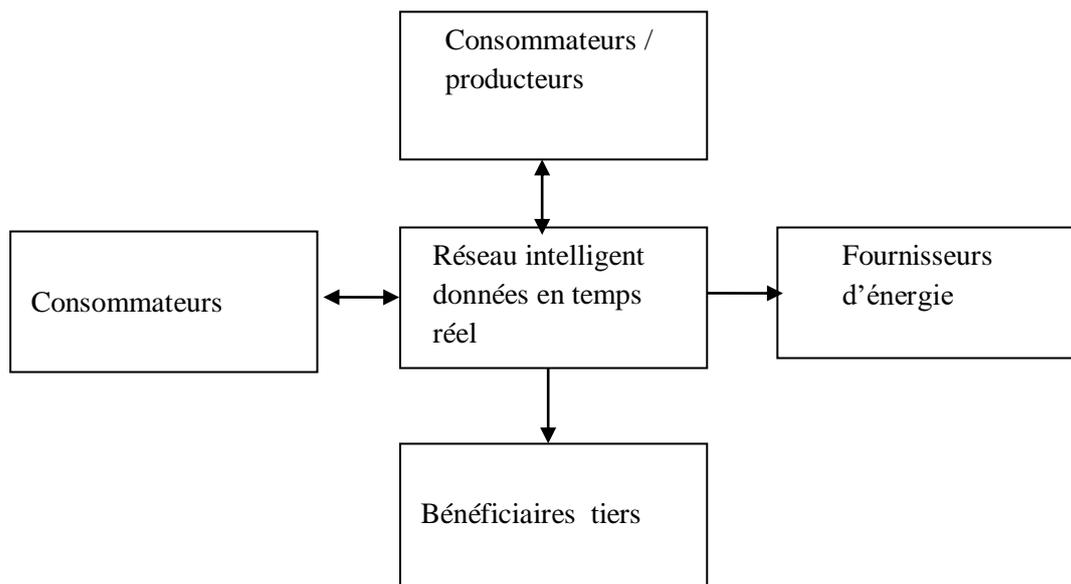
### II.12.2 Flux de données

La figure (II.8) indique le flux de données du réseau actuel. Les données circulent dans une seule direction allant du consommateur au fournisseur, sans rétroaction en temps réel. A travers les compteurs de consommation, les fournisseurs d'énergie collectent des informations et les consommateurs reçoivent des facteurs, ils sont participant passivement au flux de données actuel parce qu'il n'a pas la capacité de définir des modes spécifiques d'utilisation de l'énergie en temps réel.



**Figure II.8** Flux de données de réseau actuel

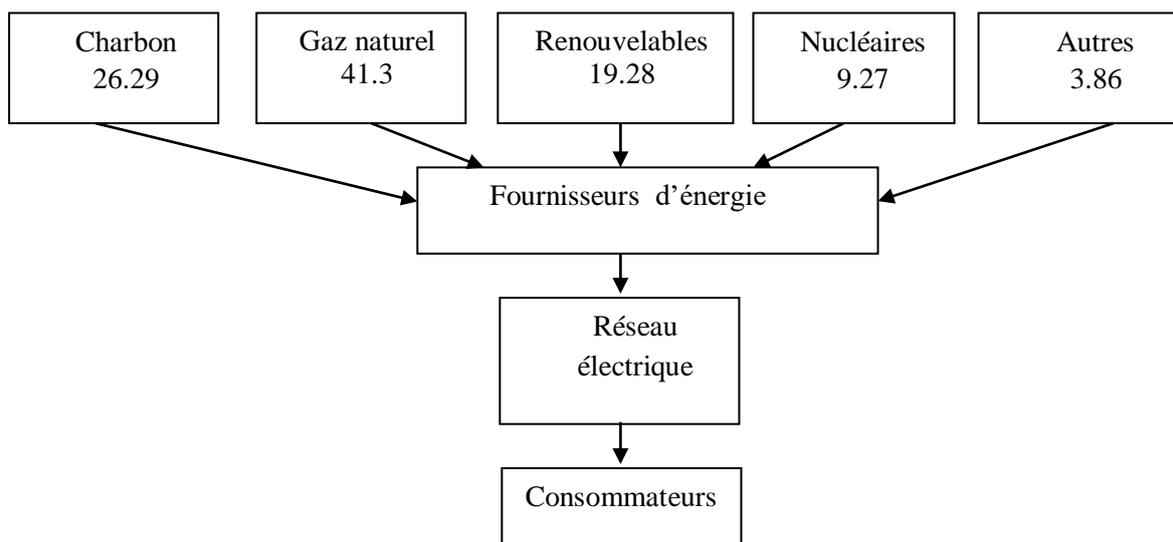
La figure (II.9) indique le flux de données du réseau intelligent. Les données se déplacent dans des multiples directions, et est accessible par les consommateurs, les entreprises de l'énergie comme information contrôlable.



**Figure II.9** Flux de données du réseau intelligent

### II.12.3 Mix de production

La figure (II.10) indique le mix de production électrique des États-Unis en 2015 [51]. Les fournisseurs d'énergies, les entreprises énergétiques et les grands groupes électrogènes indépendants offrent l'électricité au réseau. Les grandes entreprises de services publics restent contrôlées principalement les sources de combustibles. Les sources primaires - le charbon, le gaz naturel et le nucléaire - sont des carburants non renouvelables.



**Figure II.10** Mix de production électrique des États-Unis en 2015

## II.13 Technologies des micros-réseaux

L'architecture du réseau intelligent repose sur la diffusion d'un mélange de plusieurs couches d'infrastructure et de logiciels pour le contrôle, la mesure et la communication.

De nombreuses fonctions et composants ont été publiés dans le réseau moderne il y a de nombreuses années bien avant que l'on parle de réseaux intelligents, mais ils sont progressivement intégrés le champ des réseaux intelligents, Il reste encore quelques éléments essentiels à accentuer pour essayer un système opérationnel enraciné.

Pour réaliser les différentes exigences des micros-réseaux, les technologies suivantes doivent être déployées :

### II.13.1 Outils de mesure

Ces technologies permettent d'évaluer l'état du réseau, la stabilité du réseau et du système, les flux et les congestions, de surveiller l'état des équipements, de lutter contre les fraudes.

#### II.13.1.1 PMU: Phasor Measurement Units

Les unités de mesure de phase (PMU) sont des dispositifs de système d'alimentation qui fournissent des mesures synchronisées de phase en temps réel de tensions et de courants. La synchronisation est réalisée par un échantillonnage simultané des formes d'onde de tension et de courant en utilisant des signaux de synchronisation provenant du système de positionnement par satellite GPS (Global Positioning System) [52].

#### II.13.1.2 Capteurs

Les capteurs ont évolué et ont bénéficié de la microélectronique et le développement des systèmes de communication, et ces développements ont conduit à l'incorporation de nouvelles fonctions dans les capteurs, l'apparition de ce que l'on a appelé « Capteurs intelligents ».

##### a) Définition et caractéristiques

On obtient Un capteur intelligent en associant la technologie des capteurs, de l'électronique et de l'informatique. Sa fonction élémentaire est l'acquisition d'une grandeur physique, il offre des fonctions de validation, d'autodiagnostic, compensation et d'intégration

au système de conduite. C'est ce qui distingue l'instrument intelligent d'un composant standard. L'évolution des instruments fait apparaître une gradation qui débute par l'instrument analogique, et l'instrument numérique puis l'instrument intelligent avec les limites suivantes [53] :

- l'instrument analogique transforme une grandeur physique en un signal électrique exploitable ;
- l'instrument numérique offre la même fonction de conversion, mais en passant par une chaîne de traitements ou figure une ou plusieurs opérations numériques, qui améliore cette fonction élémentaire.
- l'instrument intelligent a la capacité de crédibiliser sa fonction associée à une implication plus importante dans la réalisation des fonctions du système auquel il appartient. Cette « crédibilisation » fait valider la mesure produite pour le capteur.

Les équipements intelligents coopèrent via un système de communication dédié, prennent des décisions, sélectionnent les données à transmettre.

Un instrument intelligent se compose alors de trois sous ensembles :

- un transducteur-conditionneur,
- une unité de traitement numérique,
- une interface de communication permettant un dialogue bidirectionnel numérique avec le reste du système.

#### b) Domaine d'utilisation des capteurs

Les capteurs intelligents sont utilisés dans [53] :

- ✓ **le contrôle-commande** : afin d'être renseigné en temps réel sur l'état du système, et/ou sur les caractéristiques du produit fabriqué ou du service fourni ;
- ✓ **la sûreté** : la protection des opérateurs, l'équipement ou l'environnement ;
- ✓ **la maintenance** : pour connaître l'état de dégradation du système ;
- ✓ **la gestion de production** : pour obtenir des caractéristiques des différents flux de produit ou d'énergie ;
- ✓ **la gestion technique** : pour connaître la disponibilité du processus.

L'intelligence de l'équipement conduit à une diminution des coûts et des délais de développement, et les coûts de production. Les intérêts résidant essentiellement dans :

- la traçabilité de la vie de l'équipement ;
- l'amélioration de performances ;

- les aides à la configuration et à la mise au point.

### **II.13.1.3 Compteurs intelligents**

Un compteur intelligent, est un compteur énergétique (électrique en général) et l'un des concepts clés des réseaux intelligents car il permet de communiquer sur les données de consommations.

Ce compteur intelligent est en outre communicant et transmet par différents canaux (courant porteur, téléphone, Internet) qui intègre des équipements et des logiciels permettant de communiquer, compter, et d'analyser les consommations des clients.

### **II.13.2 Systèmes de contrôle et de détection**

Les technologies de l'information et de la communication sont omniprésentes dans les systèmes de contrôle et d'automatisation industrielle depuis quelques décennies.

Les systèmes de contrôle et d'analyse de données ayant pour but de prévenir les incidents et les contraintes sur le réseau électrique, ou de collecter et décrypter les données de consommation/production propres aux usagers et la collecte / l'analyse de données, suivis d'un diagnostic. On peut distinguer deux catégories principales de système :

#### **II.13.2.1 Système SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)**

Le contrôle de surveillance et l'acquisition de données (SCADA) est une architecture de système de contrôle comprenant des ordinateurs, des communications de données en réseau et des interfaces utilisateur graphiques (GUI) pour la gestion de la surveillance des processus de haut niveau, tout en comprenant également d'autres dispositifs périphériques comme les contrôleurs logiques programmables (PLC) et les contrôleurs discrets proportionnels-intégrés-dérivés (PID) pour l'interface avec les installations ou les machines de traitement. L'utilisation du SCADA a également été envisagée pour la gestion et l'exploitation de processus de construction pilotés par des projets [54].

#### **II.13.2.2 Indicateurs de défaut (Fault passage indicators FPI)**

La principale fonction du système d'indication de passage de défaut est d'identifier les défauts survenant dans la section aval à partir du point de son installation dans le système de

moyenne tension. Pour ce faire, il faut la surveillance continue de la présence de tension et du flux de courant dans ligne à moyenne tension [55].

Toute augmentation du courant ainsi que l'absence de tension sont signalées par l'équipement. L'état de panne est indiqué par des feux clignotants dans le FPI ; ces informations sont envoyées par signaux radio à la passerelle de communication pour la suite transmission au système SCADA du centre de contrôle par un canal de communication approprié.

Grâce à ce système, le service public acquiert des informations concernant la section de la ligne en défaut. Cette identification permet d'éliminer les patrouilles de toute la ligne pour trouver la panne, ce qui réduit en fin de compte le temps de restauration.

### **II.13.3 Intégration des énergies renouvelables**

Aujourd'hui, les réseaux électriques modernes doivent faire face à un certain nombre de défis tels que la demande croissante d'électricité, le vieillissement des infrastructures de service public et sans oublier l'impact environnemental des gaz à effet de serre produits par la production d'électricité conventionnelle. Afin d'accroître la pénétration des énergies renouvelables, mais sans négliger les questions de sécurité et de fiabilité au cours du processus, les réseaux de distribution d'électricité doivent évoluer vers un réseau électrique flexible, mieux connu sous le nom de réseau intelligent, dans lequel l'intelligence distribuée, les technologies de communication et les systèmes de contrôle automatisés jouent un rôle moteur. En tenant compte de ce nouveau cadre, les techniques d'optimisation intelligentes apparaissent comme la seule manière appropriée de concevoir ce réseau intelligent de manière optimale. Dans ce mémoire, une formulation d'optimisation généralisée est introduite pour déterminer l'emplacement optimal des générateurs distribués afin d'offrir une capacité de puissance réactive. Afin de trouver une solution appropriée à ce problème de gestion de la puissance réactive, des algorithmes génétiques sont appliqués dans les cas où différentes fonctions multi-objectives doivent être prises en compte. Une description plus détaillée du processus d'évolution des algorithmes génétiques est présentée dans un exemple de micro-réseau [56].

### II.13.4 Stockage d'énergie électrique

Les fonctionnalités et les applications des technologies de stockage de l'énergie dépendent de leurs caractéristiques, notamment de leur classement, de leur dynamique, de leur encombrement et de leurs performances. La caractéristique nominale est déterminée par la puissance et la cote énergétique. La puissance nominale fait référence au taux de charge/décharge tandis que la puissance énergétique représente la durée de décharge. La dynamique peut être évaluée par le temps de réponse et le taux de rampe. Le temps de réponse est la durée pendant laquelle le stockage d'énergie passe de la décharge nulle à la décharge complète et la vitesse de rampe est la vitesse à laquelle la puissance de sortie peut changer. L'espace requis dépend de la puissance et des densités d'énergie, et la performance peut être exprimée comme l'efficacité du stockage d'énergie [57].

Selon les contraintes techniques imposées au stockage, on pourra choisir comme technologie de stockage :

- les technologies électrochimiques (batteries à électrolyte organique batteries haute température, etc.) ;
- les technologies mécaniques (volant à inertie, pompage hydro, air comprimé).
- les véhicules électriques.

Chacune de ces technologies a ses spécificités (capacité à livrer de la densité énergétique, de la puissance, de coût, de durée de vie, etc.). Donc le stockage de l'énergie constitue véritablement l'épine dorsale du système.

### II.13.5 Infrastructure énergétique

Ces technologies permettent de changer la forme de l'électricité et sont essentielles pour gérer les flux d'énergie des réseaux maillés, raccorder les liaisons à courant continu, les plans de tension et la qualité de l'onde, on distingue :

#### II.13.5.1 FACTS (Flexible Alternatif Current Transmission Systems)

La technologie FACTS est essentielle pour atténuer certaines de ces difficultés, mais pas toutes. La technologie FACTS ouvre de nouvelles possibilités pour contrôler le pouvoir et améliorer la capacité utilisable des lignes actuelles, ainsi que des lignes nouvelles et améliorées [58]. Le site la possibilité de contrôler le courant, et donc l'alimentation, par une

ligne permet un grand potentiel d'augmentation de la capacité des lignes existantes. Ces possibilités se présentent grâce à la capacité des contrôleurs FACTS de contrôler les paramètres interdépendants qui régissent le fonctionnement des systèmes de transmission, y compris l'impédance série, l'impédance shunt, le courant, la tension, l'angle de phase et l'amortissement des oscillations [59].

Les dispositifs FACTS sont insérés dans un réseau pour satisfaire plusieurs besoins tels que :

- Réduire des pertes actives totales.
- Augmenter la capacité de transport de la puissance active.
- Améliorer le contrôle de la tension et la stabilité du réseau.
- Compenser l'énergie réactive.
- Maîtriser la répartition et les transits des puissances.
- Améliorer la stabilité électromécanique des groupes de production.

### **II.13.5.2 HVDC (High Voltage Direct Current)**

Une autre option pour contrôler le flux d'énergie est le transport de courant continu à haute tension (HVDC). Les appareils HVDC convertissent le courant alternatif en courant continu, le transportent sur une ligne de courant continu et convertissent ensuite DC de retour à AC. Permet de transmettre 5 fois plus de puissance sur la même ligne aérienne. Cela permet d'intégrer efficacement des sources d'énergie renouvelables décentralisées (tels que les parcs éoliens offshore) vers les centres de consommation mondiaux [60-61].

## **II.14 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons abordé de présenter le micro-réseau et sa constitution et aussi comment ça fonctionne.

L'augmentation de la consommation énergétique mondiale et les changements climatiques sont à l'origine de la recherche de nouvelles technologies de génération d'électricité qui ne dépendent pas des carburants fossiles et qui ne mettent pas l'environnement en danger. Les sources d'énergie renouvelable ont un rôle principal pour satisfaire une grande partie des besoins énergétiques de l'humanité. Les secteurs résidentiel et industriel sont les plus grands consommateurs d'énergie électrique, et une simple

augmentation de la part des énergies renouvelables peut aussi avoir des effets néfastes pour la stabilité et le bon fonctionnement de la totalité du système électrique.

Les réseaux intelligents devraient modifier les modes de consommation et les relations des consommateurs avec le système de production.

À long terme, le développement des réseaux intelligents devrait s'étendre à tous les réseaux interconnectés.

# **Chapitre III**

**Les problèmes d'optimisation**

**Multi-objective (CEED)**

### III.1 Introduction

La répartition économique de la charge est l'un des objectifs essentiels de l'exploitation, de la gestion et de la planification des systèmes d'énergie électrique.

Le problème de la répartition économique est l'un des problèmes les plus importants dans l'exploitation des systèmes d'énergie électrique. Dans un système à grande échelle, le problème est plus complexe et il est difficile de trouver une solution optimale car il s'agit d'une fonction non linéaire et il contient un certain nombre d'optimums locaux.

Le problème de la répartition économique des émissions combinées (CEED) consiste à programmer la production des unités de production engagées pour répondre à la demande de la charge requise à un coût d'exploitation minimal avec un minimum d'émissions simultanées.

L'objectif principal de la répartition économique de la charge est de réduire le coût total de production du système de production et, en même temps, les contraintes d'égalité et d'inégalité nécessaires doivent également être respectées. Cela conduit au développement des techniques du CEED. Plusieurs chercheurs ont proposés diverses techniques pour résoudre le problème du CEED en se basant sur des techniques d'optimisation [62-63-64].

Chaque technologie utilisée pour produire de l'électricité a des impacts environnementaux néfastes. Par exemple, les centrales électriques au charbon rejettent dans l'atmosphère  $SO_2, NO_x$ , du mercure et d'autres polluants [65].

Ce chapitre présente une nouvelle méthode pour résoudre le problème de dispatching économique/environnemental combinées (CEED).

### III.2 Historique des techniques optimisations

Pour résoudre le problème d'optimisation, on cherche à maximiser ou à minimiser une quantité spécifique appelée objectif, qui dépend d'un nombre fini de variables (d'entrée). Ces variables peuvent être indépendantes les unes des autres ou peuvent être liées par une ou plusieurs contraintes. L'existence de méthodes d'optimisation peut être attribuée au jour de Newton, Lagrange, et Cauchy, en raison du développement du calcul différentiel, du calcul de et d'autres méthodes de base antérieures. Malgré ces premières contributions, très peu de progrès ont été réalisés jusqu'à ce que au milieu du XXe siècle. Le progrès des techniques d'optimisation a été rendu possible par l'utilisation d'ordinateurs numériques à grande vitesse en 1960 (Royaume-Uni), 1947 (Dantzig), 1957 (Kuhn et Tucker), 1982 (Von Neumann) [66].

### III.3 Formulation mathématique d'un problème d'optimisation

Un problème d'optimisation (P) peut être formulé de façon générale comme suit :

$$P = \begin{cases} \max/\min f_{obj}(x) \in I \\ g_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, p \\ h_i(x) = 0, i = 1, \dots, q \\ x_{kmin} \leq x_k \leq x_{kmax} \end{cases} \quad (III.1)$$

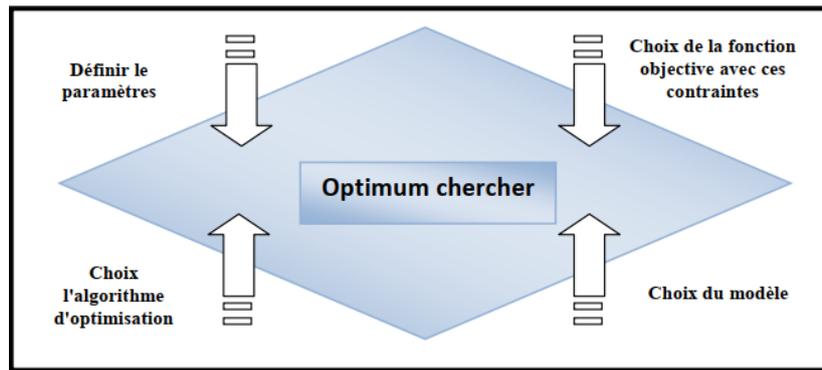
Où :

- ✓  $f_{obj}(x) = f(x)$  est le critère à minimiser, souvent appelé fonction objectif.
- ✓  $g(x) = G(x), h_j(x) = H(x)$  représente respectivement les contraintes d'inégalité et d'égalité.
- ✓  $x_{kmin}, x_{kmax}$ , désignent les contraintes de domaine.
- ✓  $i$ : est l'espace de recherche borné par les contraintes de domaine.

La solution d'un problème d'optimisation est alors donnée par un ensemble de paramètres  $X^*$  pour lesquels la fonction objectif présente une valeur minimale, en respectant les contraintes d'égalité, d'inégalité et de domaine.

### III.4 Les éléments d'optimisation

L'optimisation est une des approches mathématiques consacré à l'étude du (ou des) minimum(s)/maximum(s) d'une fonction à une ou plusieurs variables sur un certain domaine de définition, et pour mener à bien une opération, plusieurs éléments sont indispensables et conditionnent la solution trouvée. La figure suivante présente les quatre éléments essentiels à la résolution d'un problème d'optimisation.



**Figure III.1** Eléments indispensable pour l'optimisation.

- ❖ **Une fonction objective** : définie l'objectif à atteindre, la définition de cette fonction est en fait un problème délicat car le problème est formulé en un problème d'optimisation par l'intermédiaire de la fonction objective, c'est elle qui est au centre de l'optimisation, c'est donc d'elle que dépend la pertinence de la solution.
- ❖ **Un modèle** : précis, robuste et malléable du système étudié est indispensable, ce modèle doit être utilisable sur un domaine d'étude le plus large possible
- ❖ **Un algorithme d'optimisation** : permet de trouver la solution.

### III.4.1 Définitions générales

Le problème d'optimisation multi-objectifs (également appelé optimisation multi-critères, multi-performances ou problème d'optimisation vectorielle) peut alors être défini comme le problème consistant à trouver [67] "un vecteur de variables de décision qui satisfait aux contraintes et optimise une fonction vectorielle dont les éléments représentent les fonctions objectives. Ces fonctions forment une description mathématique des critères de performance qui sont généralement en conflit les uns avec les autres. Par conséquent, le terme "optimiser" signifie trouver une telle solution qui donnerait les valeurs de toutes les fonctions objectives acceptables pour le décideur".

### III.5 Un problème multi objectif

Un problème multi-objectif [68] peut être défini comme un problème qui cherche à trouver une solution optimale qui inclut un ensemble de contraintes et une amélioration des vecteurs fonctionnels objectifs. Dans ce qui suit, nous verrons que les problèmes d'optimisation ont de nombreuses solutions convergentes en général car il n'est pas possible de définir la définition de l'optimisation dans les problèmes à objectifs multiples.

### III.5.1 Variables de décision

Les  $m$  variables de décision sont les valeurs à choisir dans un problème d'optimisation. Ces valeurs sont notées  $x_i, i \in \{1, \dots, m\}$ . Le vecteur  $x$  de  $m$  variables de décision est représenté par  $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ . Les vecteurs de variables de décision forment le vecteur  $X$ .

Les  $n$  fonctions objectifs à optimiser sont notées  $f_i, i \in \{1, \dots, n\}$  et le vecteur  $f$  de  $n$  objectifs pour  $x \in X$  est représenté par :  $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x))$ .

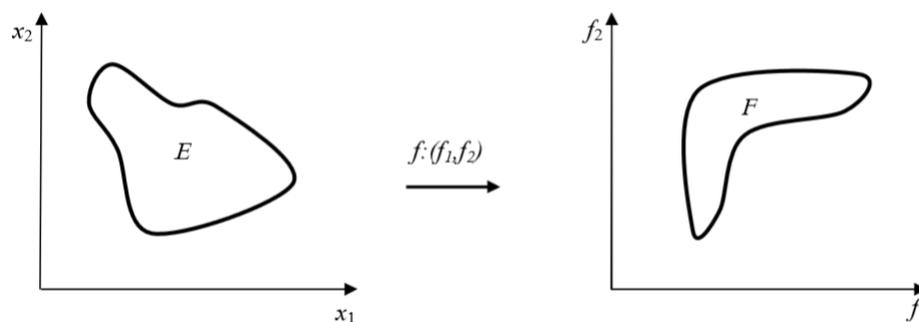
Seul le cas de minimisation est traité sans perte de généralité : maximiser  $f_i$  revient à minimiser  $-f_i$ .

Les  $g$  contraintes limitent les valeurs que peuvent prendre les variables de décision. Elles sont notées  $g_i(x), i \in \{1, \dots, p\}$ .

Un problème d'optimisation multi objectif est donc un triplet  $(X, f, g)$  qui consiste à minimiser  $f(x)$  pour  $x \in X$  sachant que  $g(x) \leq 0$ .

L'union des domaines de définition de chaque variable et les contraintes forment un ensemble  $E$  que nous appelons l'ensemble des actions réalisables.

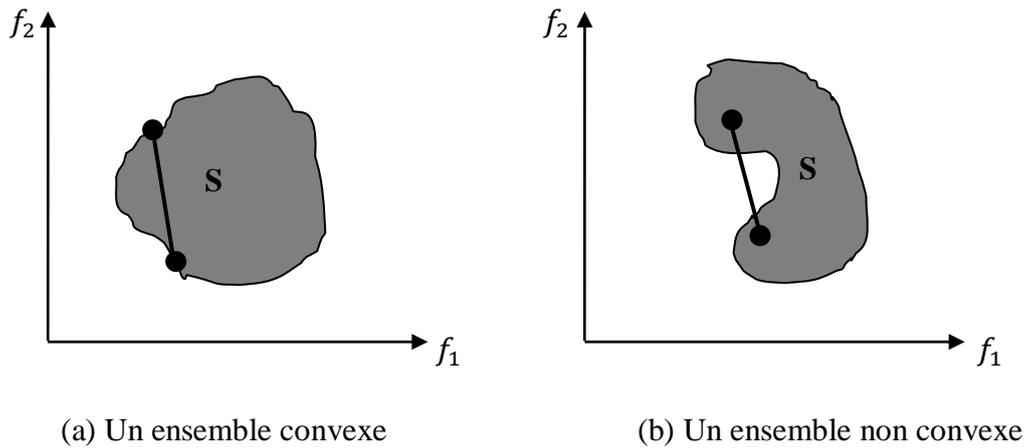
Nous appellerons  $F$  l'ensemble des objectifs réalisables.



**Figure III.2** Définition de  $E$ ,  $F$  et  $f$

### III.5.2 La convexité

Un ensemble  $S$  est convexe si, compte tenu de deux points distincts de cet ensemble, le segment reliant ces deux points est contenu dans l'ensemble  $S$ .



**Figure III.3** Exemples d'ensemble convexe et d'ensemble non convexe

### III.6 Dispatchabilité

La propagation des moyens de production indique le fait que la puissance produite par les centrales peut être contrôlée par le producteur. Dans ce contexte, il existe une distinction générale et spéciale entre les méthodes de production conventionnelles thermiques et hydrauliques et les méthodes de production mortelles.

L'exploitant de moyens de production conventionnels thermiques et hydrauliques à réservoir peut fixer la puissance produite. Ces moyens de production conventionnels sont dits dispatchables.

#### III.6.1 Dispatching économique environnementale

##### III.6.1.1 Minimisation du coût du carburant

La répartition économique ou la minimisation de la fonction de coût du carburant est représentée par une fonction de coût cubique, et le coût total en (dollars/h) peut être exprimé sous la forme :

$$F(p) = \sum_{i=1}^n a_i P_i^3 + b_i P_i^2 + c_i P_i + d_i \quad (\text{III.2})$$

Où  $n$  est le nombre total d'unités de production,  $P_i$  est la puissance de sortie réelle de l'unité de production  $i$ ; et  $a_i, b_i, c_i$  et  $d_i$  sont les coefficients de coût de l'unité de production  $i$ .

##### III.6.1.2 Minimisation des émissions de SO<sub>2</sub>

L'émission totale de SO<sub>2</sub>  $E_{SO_2}(P)$  en (kg/h) due au système de production thermique à combustible fossile peut être exprimée comme suit :

$$E_{SO_2}(P) = \sum_{i=1}^n e_{SO_2} P_i^3 + f_{SO_2i} P_i^2 + g_{SO_2i} P_i + h_{SO_2i} \quad (\text{III.3})$$

Où  $e_{SO_2i}$ ,  $f_{SO_2i}$ ,  $g_{SO_2i}$  et  $h_{SO_2i}$  sont les coefficients d'émission de  $SO_2$  pour l'unité de production  $i$ .

### III.6.1.3 Minimisation des émissions de $NO_x$

Les émissions totales de  $NO_x$  des centrales thermiques peuvent être indiquées par  $E_{NO_x}(p)$  en (kg/h) et exprimées sous la forme :

$$E_{NO_x}(P) = \sum_{i=1}^n e_{NO_xi} P_i^3 + f_{NO_xi} P_i^2 + g_{NO_xi} P_i + h_{NO_xi} \quad (\text{III.4})$$

Où  $e_{NO_xi}$ ,  $f_{NO_xi}$ ,  $g_{NO_xi}$  et  $h_{NO_xi}$  sont les coefficients d'émission de  $NO_x$  pour l'unité de production  $i$ .

### III.6.2 Dispatching économique environnementale combiné (CEED)

Les études de la répartition combinée économie/émission (CEED) consistent à rechercher la minimisation simultanée de deux fonctions décrites par les mêmes objets variables, ce qui nous donne un problème d'optimisation bi-objectif ou bi-critère. La principale difficulté d'un tel problème d'optimisation est liée à la présence de conflits entre les deux fonctions. Pour cela, nous avons transformé ce problème en un problème d'optimisation mono-objectif en introduisant un facteur de pénalité prix "he" [69], de sorte que la fonction objectif que nous devons optimiser est la suivante :

$$\text{Min} \{C = \sum_{i=1}^{nG} F_i(P_i) + h \sum_{i=1}^{nG} E_i(P_i)\} \quad (\text{III.5})$$

### III.7 Le modèle mathématique de dispatching économique

Les producteurs d'électricité ont déterminé expérimentalement des courbes montrant le coût de production de chaque groupe en fonction de la puissance qu'il fournit. La fonction associée à ces courbes est un polynôme de degré "n". En pratique, le plus souvent, elle est présentée comme un polynôme de second degré [69] :

$$F_i = a_i P_i^2 + b_i P_i + C_i \quad (\text{III.6})$$

La fonction  $F_i$  n'est connue que sous une forme discrète, c'est-à-dire à partir d'un certain nombre de points. C'est pourquoi elle utilise des méthodes d'interpolation pour déterminer les coefficients  $a_i$ ,  $b_i$  et  $c_i$ , qui sont spécifiques à chaque unité de production.

La minimisation de la fonction de coût total pour la production d'énergie électrique est un point qui se présente comme suit :

$$\text{Min } \{A = \sum_{n=1}^{nG} F_i (P_i) \} \quad (\text{III.7})$$

Sous les contraintes :

$$P_{i,\min} < P_i < P_{i,\max} \quad (\text{III.8})$$

$$\sum_{n=1}^{nG} P_i = P_D + P_L \quad (\text{III.9})$$

Où,  $P_D$  est la demande totale et  $P_L$  représente les pertes de transmission.  $P_{i,\min}$  et  $P_{i,\max}$  sont les limites de production minimale et maximale de  $i$  unité.

L'expression de la perte de transmission en fonction de la puissance générée est donnée par :

$$P_L = \sum_{i=1}^{nG} \sum_{j=1}^{nG} P_i B_{ji} P_j \quad (\text{III.10})$$

Où  $B_{ji}$  est une constante appelée coefficients  $B$  ou coefficients de perte.

### III.8 Le modèle mathématique de dispatching environnementale

Le problème de la fonction de dispatching environnemental est de minimiser les émissions de gaz des centrales électriques (minimiser les émissions de  $NO_x$  dans notre cas). Il peut être décrit comme suit :

$$E_i = d_i P_i^2 + e_i P_i + f_i \quad (\text{III.11})$$

Sous les contraintes données par les équations 7 et 8  $E_i$  est la fonction de l'émission et  $d_i$ ,  $e_i$  et  $f_i$  sont les coefficients caractéristiques d'émission attachés à chaque groupe de production.

### III.9 L'intégration de l'énergie éolienne dans le réseau électrique

#### III.9.1 L'énergie éolienne

Le vent est une forme d'énergie solaire. Les vents sont causés par le réchauffement inégal de l'atmosphère par le soleil, les irrégularités de la surface de la terre, et rotation de la terre. Les schémas d'écoulement du vent sont modifiés par le terrain de la terre, les masses

d'eau, et le couvert végétal. Ce flux de vent, ou mouvement l'énergie, lorsqu'elle est "récoltée" par les éoliennes modernes, peut être utilisée pour produire de l'électricité.

La puissance contenue sous forme de énergie,  $P(W)$ , le vent est exprimé par :

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (\text{III.12})$$

$A$  est la surface traversée par le vent ( $\text{m}^2$ ) ;  $\rho$  est la densité de l'air ( $= 1,225 \text{ kg/m}^3$ ) et  $V$  est la vitesse du vent ( $\text{m/s}$ ).

### III.9.2 Les turbines éoliennes

Les éoliennes, comme les pales des hélices d'avion, tournent dans l'air en mouvement et alimentent un générateur qui fournit un courant électrique. En termes simples, une éolienne est l'opposé d'un ventilateur. Au lieu d'utiliser l'électricité pour produire du vent, comme un ventilateur, les éoliennes utilisent le vent pour produire de l'électricité. Le vent fait tourner les pales, qui font tourner un arbre, lequel se connecte à un générateur et produit de l'électricité.

Le générateur éolien peut en récupérer une partie de l'énergie éolienne et représente l'énergie produite par éolienne :

$$F_{\text{éolienne}} = \frac{1}{2} \rho C_e A V^3 \cdot 10^{-3} \quad (\text{III.13})$$

$C_e$  est le facteur d'efficacité, qui dépend de la vitesse du vent et l'architecture du système.

### III.10 L'intégration de l'énergie solaire

Le générateur solaire peut en récupérer une partie de l'énergie solaire et représente cette énergie sous forme :

$$F_{\text{solaire}} = C_s P_s \quad (\text{III.14})$$

### III.11 Les Méthodes d'optimisations

#### III.11.1 Les méthodes déterministes

Cette catégorie de méthode d'optimisation combine diverses techniques de résolution de problèmes qui n'utilisent pas un concept aléatoire. Il peut être divisé en deux catégories principales [70] :

- Les méthodes directes : Se servent d'hypothèses sur la fonction objective à optimiser. Par exemple, la fonction peut être continue et dérivable en tout point de l'espace de recherche. On peut ainsi calculer la direction de descente de la plus forte pente pour orienter la recherche.
- Les méthodes indirectes: utiliser des principes mathématiques pour résoudre des systèmes d'équations linéaires et non linéaires, avec ou sans certaines contraintes, etc. La méthode directe connue est la méthode du gradient, que nous verrons plus en détail.

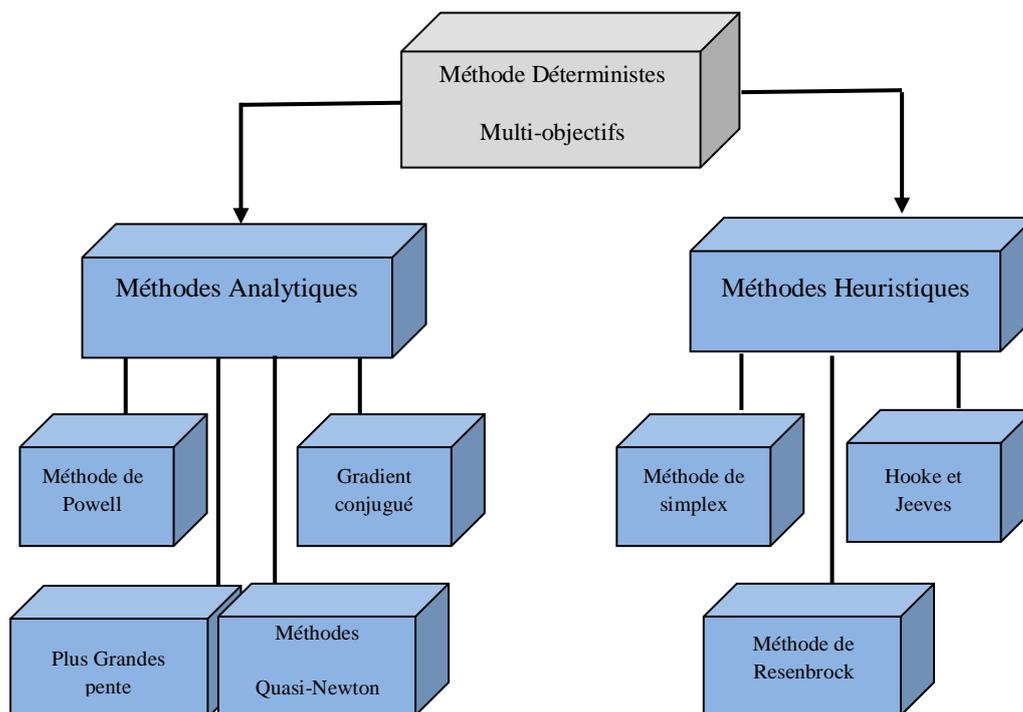


Figure III.4 Les méthodes déterministes Multi- objectifs

## III.11.2 Méthodes Heuristiques

### III.11.2.1 La méthode de Hooke et Jeeves

Dans la méthode Hooke-Jeeves (1960), une combinaison de mouvements exploratoires et de mouvements heuristiques est effectuée de manière itérative, chaque itération de cette méthode se décompose en deux étapes [71] :

- Une étape exploratoire consiste à se déplacer dans les directions de base, afin de valoriser la fonction objective.
- Une étape qui introduit une " Déplacement de la recherche de modèle" qui vise à faire une projection selon les deux derniers vecteurs qui ont amélioré la fonction de la cible.

La méthode converge rapidement lorsque la vallée n'est pas inclinée et assez droite, mais elle est plus lente (voire pas du tout) lorsqu'elle est pliée. Pendant la phase exploratoire, les variables sont examinées en permanence dans un ordre fixe. Ainsi, cette méthode est mieux adaptée aux problèmes dans lesquels les variables de décision sont indépendantes les unes des autres. Cependant, la phase d'exploration se concentre sur les directions initiales des variables.

### III.11.2.2 Méthode de Rosenberg

La méthode de Rosenberg, également connue sous le nom de "rotation de coordonnées", l'exploration est indépendante des directions initiales. Il s'agit d'une méthode itérative divisée en deux étapes itératives [72] :

- La première étape consiste à explorer la réalisation d'améliorations successives à travers des tendances distinctes, une étape globale visant à construire une nouvelle base en direction de deux sorties consécutives.
- La vitesse approximative de la méthode dépend du choix de la règle de départ. De plus, cela nécessite de reconstruire une nouvelle règle à chaque itération, ce qui rend la méthode coûteuse lorsque la taille du vecteur des variables décision est grande.

### III.11.3 Les Méthodes Analytiques

#### III.11.3.1 La méthode de Newton Raphson

La méthode généralisée de Newton-Raphson, également connue sous le nom de technique de quasi linéarisation, est utilisée pour résoudre des équations différentielles non linéaires du type valeur limite résultant des équations transitoires des réacteurs à lit tassé. Cette technique s'est avérée être un outil efficace pour la résolution numérique des problèmes de valeurs limites dans les équations différentielles ordinaires non linéaires. Il est démontré que cette technique est tout aussi efficace pour traiter les équations différentielles particulières paraboliques non linéaires. Dans un exemple numérique, seules quelques itérations sont nécessaires pour cette technique par rapport aux 25 itérations requises par la méthode convergente du premier ordre habituellement utilisée.

Celle - ci démarre d'un point initial  $x_0$  et calcule le nouveau point par la relation :

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f'(x)}{f''(x)} \quad (\text{III.15})$$

Le principal inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite une fonction objective qui est doublement reconnaissable, comme  $\forall x_k f''(x_k) > 0$ . Cependant, elle est particulièrement utile lors de l'optimisation d'une fonction localement convexe.

#### III.11.3.2 Méthode Quasi-Newton

La méthode de Quasi-Newton est une méthode d'ordre 1 qui tente d'approximer successivement la méthode de Newton. Il s'agit de trouver une approximation matricielle approximative pour chaque occurrence sans compter la dérivée seconde ni ou l'inverse de la dernière. Étant donné l'expansion de la série de Taylor à l'ordre 1 pour le vecteur de gradient spécifié dans le paragraphe précédent autour du point  $x_k$  [73].

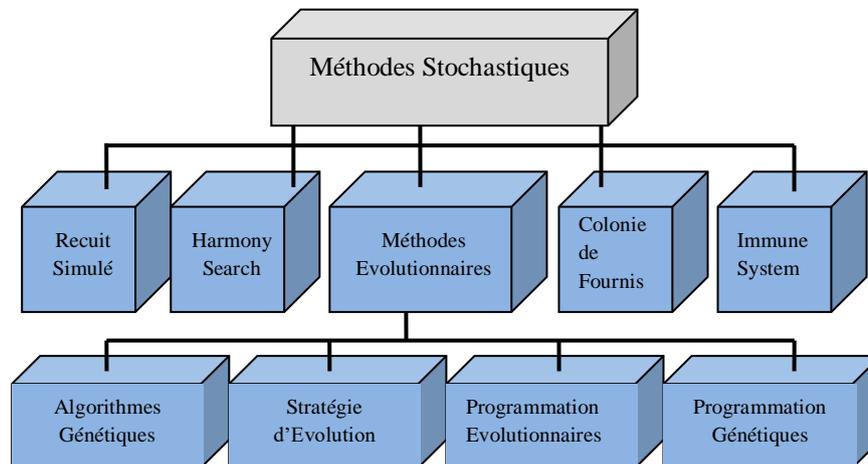
$$g^{(k+1)} = g^{(k)} + H^k(x_{k+1} - x_k) \quad (\text{III.16})$$

### III.11.4 Les méthodes d'optimisation stochastiques

Les méthodes stochastiques (aléatoires) nous permettent d'étudier les comportements en moyenne, en modélisant de façon probabiliste de parties du système que l'on ne veut pas ou qu'on ne peut atteindre ou décrire en détail. Les méthodes aléatoires fournissent les outils nécessaires pour dériver les distributions de probabilité de grandes quantités de production,

selon les entrées et le modèle (déterministe ou non) du système. Par conséquent, ils utilisent au mieux ces informations pour prendre les décisions appropriées [74].

La figure ci-dessous présente les méthodes stochastiques les plus utilisées.



**Figure III.5** Les méthodes stochastiques

### III.11.5 Les méthodes méta heuristiques

Les métras heuristiques sont des cadres généraux permettant de construire des heuristiques pour les problèmes d'optimisation combinatoire et globale [75].

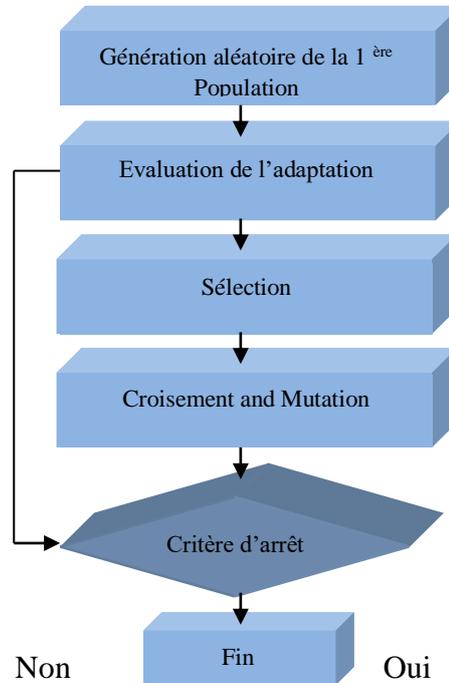
La méta heuristique est un algorithme aléatoire qui progresse de manière optimale en échantillonnant une fonction objective. Il s'agit également d'une méthode générale qui peut traiter un large intervalle de problèmes différents, sans nécessiter de modifications majeures de l'algorithme utilisé [76].

#### III.11.5.1 L'algorithme génétique

Les algorithmes génétiques font partie de méthodes stochastiques. Ils ont été introduits par (J.Holland en 1975) [77].

L'AG est largement utilisée dans le système électrique. Son point fort est qu'elle n'a pas de contrainte différentiable, et qu'elle est facile à réaliser la recherche de solutions optimales à partir de la situation globale. Mais l'expérience montre que la diversité des individus est tombante au fur et à mesure de l'évolution de la colonie, des solutions optimales faciles à obtenir localement, et la capacité de recherche locale est faible.

L'AG est une technique de recherche stochastique qui conduit un ensemble de population dans l'espace des solutions évoluées en utilisant les principes de l'évolution génétique qui commence par la génération aléatoire de la population initiale, puis la sélection, le croisement et la les opérations de mutation sont précédées jusqu'à ce que la fonction d'aptitude converge vers un maximum ou le nombre maximum de générations est atteint [78].



**Figure III.6** Organigramme de l'algorithme génétique

L'algorithme génétique basé sur 3 tapes essentielles :

### 1- La sélection

La sélection est une composante essentielle des GA, jouant un rôle important notamment dans la résolution des problèmes d'optimisation difficiles. La sélection consiste à sélectionner un individu au sein de la population puis à le recopier dans la nouvelle population. La sélection est effectuée au moyen d'une fonction d'adaptation (fonction d'aptitude) qui est calculée pour chaque individu de la population. La probabilité de reproduire ou de sélectionner un individu dépend directement de la valeur de sa fonction objective.

## 2- L'opération de croisement

Crossover est un opérateur de recombinaison. Son objectif est d'enrichir la diversité de la population en traitant les composants des individus (chromosomes).

## 3- La mutation

La mutation aura lieu après avoir effectué le crossover [79]. La descendance issue du crossover est modifiée de manière aléatoire par l'opération de mutation. La mutation joue un double rôle : elle effectue une recherche locale et assure en outre une recherche aussi globale que locale, en fonction du poids et du nombre des bits déplacés ; de plus, elle garantit mathématiquement que l'optimum global peut être atteint.

### III.11.5.2 Optimisation par Essaim de Particules

L'optimisation par essaim de particules (PSO) est née en 1995 aux États-Unis sous le nom de Particule Optimisation des essaims (PSO) [80]. Cet algorithme s'inspire des grands regroupements de comportements d'animaux tels que des nuages épais d'oiseaux, des bancs de poissons et des essaims de criquets. Un essaim est constitué d'un ensemble de particules, où chaque particule représente une solution potentielle et est dotée de certaines capacités :

- ✓ Capable d'estimer la qualité de sa position et de garder en mémoire ses meilleures performances, peut consulter ses congénères (les plus proches) et obtenir de chacun d'eux sa meilleure position.
- ✓ Peut choisir le meilleur des meilleurs postes dont elle a la connaissance.
- ✓ Ayant également une vitesse aléatoire, elle peut modifier cette vitesse en fonction de cette information et de ses propres données et se déplace en conséquence.

L'algorithme de base de l'OSP peut être facilement formulé et programmé. Les particules sont distribuées aléatoirement dans l'espace de recherche de la dimension  $D$ , et chacune d'entre elles a sa propre position  $X_i^k$  et sa vitesse dans l'itération  $k$ . Chaque particule se souvient de sa propre meilleure position trouvée jusqu'à présent dans l'exploration. Cette position est appelée "meilleure position" et est indiquée par  $p_{best}$  dans l'équation (III.17). Le concept de base de la technique PSO consiste à accélérer chaque particule vers ses lieux de  $p_{best}$  et  $g_{best}$  à chaque pas de temps.

De plus, parmi ces  $p_{best}$ , il n'y a qu'une seule particule qui a la meilleure position, appelée la meilleure globale, qui est indiquée par  $g_{best}$  dans l'équation (III.17).

La vitesse modifiée de chaque particule peut être calculée en utilisant la vitesse actuelle et la distance de  $P_{best}$  et  $g_{best}$  selon (III.17). Les positions sont modifiées selon (III.18).

$$v_{id}^{k+1} = w^k \cdot v_{id}^k + c_1 \cdot rand_1 \cdot (pbest_{id} - x_{id}^k) + c_2 \cdot rand_2 \cdot (gbest_d - x_{id}^k) \quad (III.17)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (III.18)$$

Où :

$rand_2, rand_1$  : Nombres uniformément aléatoires entre 0 et 1.

$v_{id}^k$  : Vitesse du courant de l'individu i dans la dimension d à l'itération k.

$v_{id}^{k+1}$  : Vitesse de l'individu i dans la dimension d à l'itération k+1.

$v_{id}^{min} \leq v_{id}^k \leq v_{id}^{max}$  : Vitesse maximale et minimale.

$x_{id}^k$  : Position actuelle de l'individu i dans la dimension d à l'itération k.

$x_{id}^{k+1}$  : Position de l'individu i dans la dimension d à l'itération k+1.

$pbest_{id}$  : Dimension d de la  $pbest$  de l'individu i.

$gbest_d$  : Dimension d de  $gbest$  de l'essaim.

$c_1$  et  $c_2$  : la pondération de l'accélération stochastique qui tire chaque particule vers  $pbest$  et  $gbest$  (cognitive et la constante d'accélération sociale respectivement).

$w^k$  : Facteur de pondération de l'inertie qui contrôle l'exploitation et l'exploration de l'espace de recherche en ajustant dynamiquement la vitesse et qui est calculé en utilisant (III.19).

$$w^k = w^{max} - \frac{w^{max} - w^{min}}{iter^{max}} * iter \quad (III.19)$$

$iter^{max}$  : Nombre maximum d'itérations.

$iter$  : Numéro d'itération actuel.

$w^{max}$  : Poids d'inertie maximal.

$w^{min}$  : Poids d'inertie minimum.

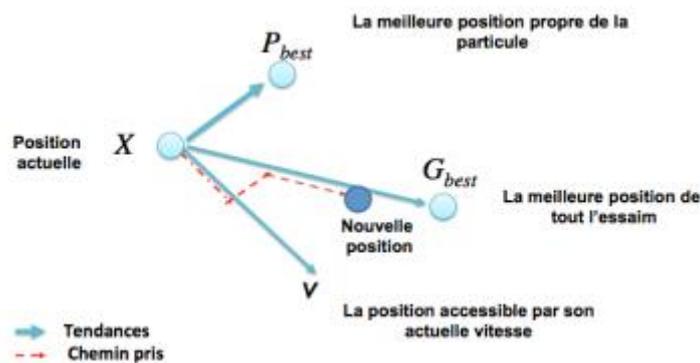
La vitesse des particules est limitée par la valeur maximale  $v^{max}$ . La vitesse maximale est caractérisée par la plage du  $i$  paramètre et est donné par (III.20).

$$v_i^{max} = \frac{U_i^{max} - U_i^{min}}{N} \quad (III.20)$$

Où :

$N$  est un nombre choisi d'intervalles dans le  $i$  paramètre.

La figure ci-dessous présente le principe de déplacement des particules dans l'espace de recherche à chaque itération.



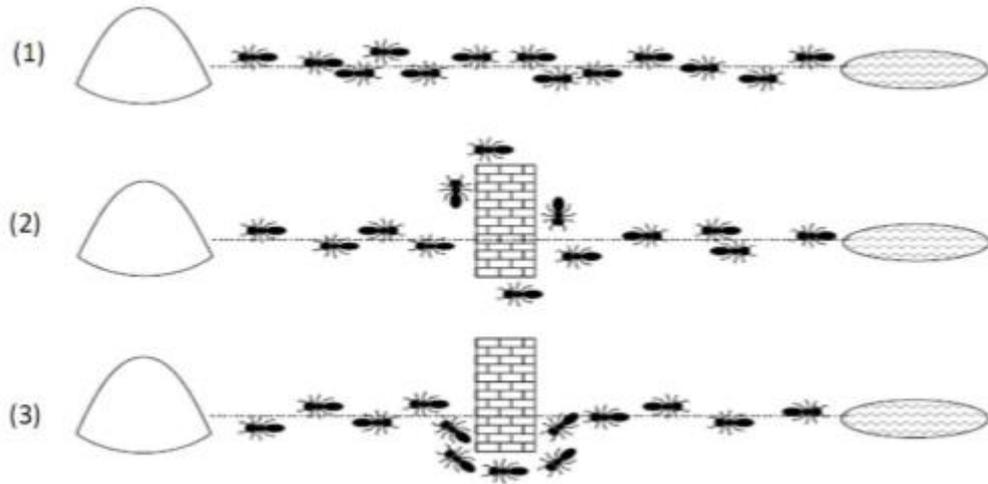
**Figure III.7** Principe de déplacement d'un point de recherche par PSO

### III.11.5.3 Colonie de Fourmis

Le principe de l'optimisation par colonies de fourmis est apparu au début des années 1990. Il est dû aux chercheurs M. Dorigo, V. Maniezzo et A. Coloni qui expliquent leur théorie dans un article fondateur [81].

L'optimisation des colonies de fourmis (ACO) est une technique d'optimisation qui s'inspire du comportement de recherche de nourriture de véritables colonies de fourmis. À l'origine, la méthode a été introduite pour l'application à des problèmes d'optimisation discrets.

L'amélioration d'une colonie de fourmis est inspirée par le comportement des fourmis lorsqu'elles cherchent de la nourriture car elles essaient constamment de choisir la meilleure méthode [82].



**Figure III.8** Faculté d'une colonie de fourmis de retrouver le chemin le plus court

### III.12 Programmation quadratique

La programmation quadratique est une méthode d'optimisation efficace pour trouver la solution globale si la fonction des objectifs est quadratique et les contraintes sont linéaires.

Elle peut être appliquée à des problèmes d'optimisation ayant des contraintes objectives non quadratiques et non linéaires en approchant la fonction objective de la fonction quadratique et les contraintes de la fonction linéaire. Pour les quatre problèmes, l'objectif est quadratique, mais les contraintes sont également quadratiques, de sorte que les contraintes doivent être rendues linéaires.

#### III.12.1 Les étapes de l'algorithme QP

**Etape 1** : définir la fonction objective de coût de production et l'émission.

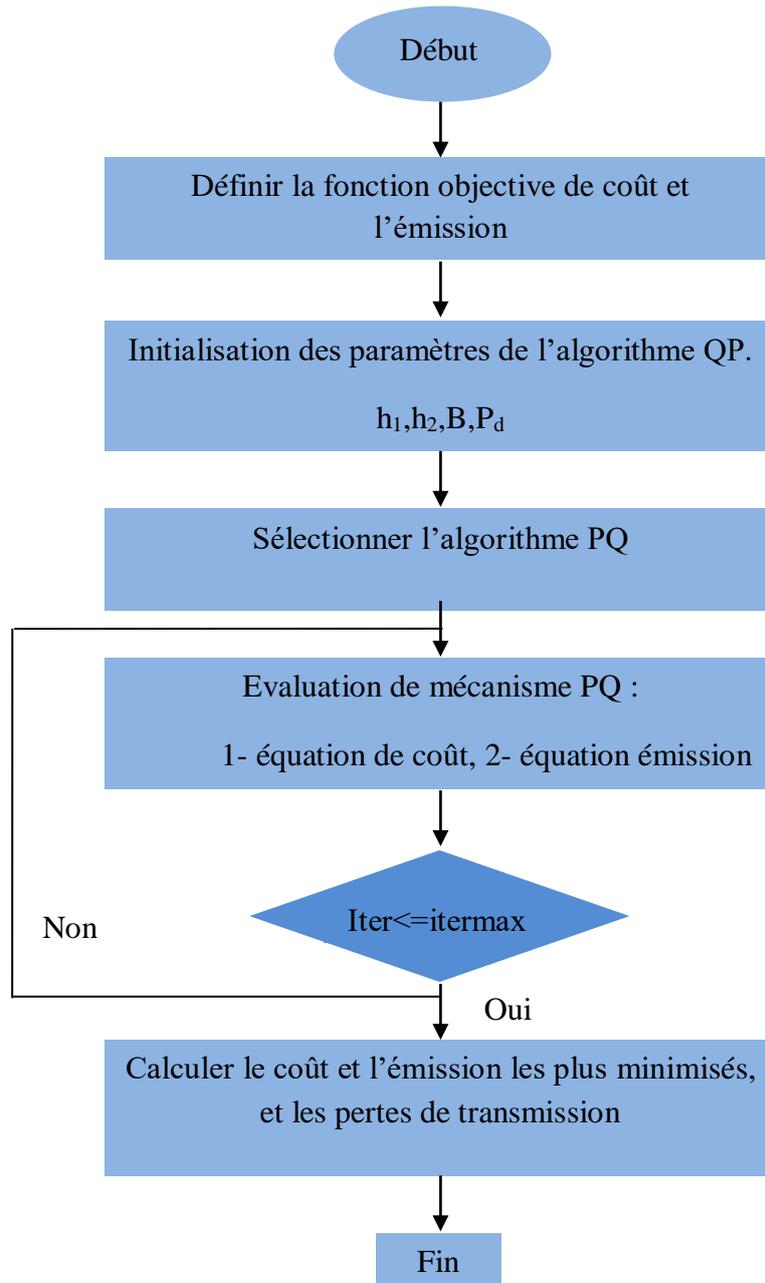
**Etape 2** : initialisation et l'adaptation des paramètres de l'algorithme  $h_1$ ,  $h_2$ , B, Pd.

**Etape 3** : évaluation de la mécanique PQ : équation de coût de production ainsi l'équation d'émission.

**Etape 4** : faire l'itération et les calculs

- ✓ Si oui afficher les résultats de coût de production et les émissions les plus minimisés avec les pertes de transmission.
- ✓ Si non il faut retourner a l'étape 3.

**Etape 5** : évaluer le coût de production et l'émission les plus minimisés avec l'affichage des pertes de transmission.



**Figure III.9** Organigramme de l'algorithme quadratique programme (QP)

Avec cet algorithme on peut traiter le problème comme multi-objectifs le coût de production et l'émission des gazes toxiques en tenant compte les pertes de transmission.

Dans cet algorithme une minimisation touche à la fois notre fonction de coût de production et l'émission avec la totalité des pertes calculées par la méthode de quadratique programme en la multipliant par un facteur de pénalité  $h_1$  et  $h_2$ .

Le nombre d'itérations de la dite approche (PQ) et aussi choisi pour que la minimisation de coût de production et les émissions de ses fonctions des pertes soit totalement minimisée afin d'aboutir à la meilleure solution de puissance générée et qui correspond des pertes les plus minimales de notre système.

### **III.13 Conclusion**

Dans ce chapitre, une optimisation stochastique combinant économie et répartition des émissions a été présentée.

La prévision stochastique des incertitudes de la modélisation de l'état du problème de l'erreur de prédiction a été la méthodologie de l'aspect. Il a été observé que les avantages économiques et environnementaux des énergies renouvelables peuvent être maximisés par l'optimisation stochastique, tout en respectant les contraintes de sécurité du système.

Ainsi nous avons présenté un aperçu sur les problèmes d'optimisation multi objectifs et leur résolution par les méthodes d'optimisation classiques dans le cas possibles et avec les méthodes heuristiques, méta heuristiques et déterministes, nous avons également parlé à la fin de ce chapitre de la méthode du programme quadratique sur laquelle nous nous sommes appuyés au chapitre quatre pour calculer l'amélioration de la transmission économique et environnementale.

# **Chapitre IV**

## **Simulation et discussion des résultats**

## IV.1 Introduction

Un système d'énergie électrique se compose de services publics de production, de transmission et de distribution qui améliorent l'énergie électrique aux consommateurs.

Le dispatch économique (DE) est la détermination de la puissance de sortie optimale des générateurs pour répondre aux besoins de la charge du système et faire fonctionner les générateurs au coût le plus bas du carburant. Le système de gestion de l'énergie est utilisé pour surveiller, contrôler et optimiser les performances des générateurs utilisés dans le réseau électrique. Le principal objectif des compagnies d'électricité est de fournir aux consommateurs un approvisionnement fiable de haute qualité au coût le plus bas possible tout en fonctionnant avec respect des limites et des contraintes imposées aux unités de production. Cela nécessite de formuler le fameux problème (DE) pour trouver la combinaison optimale de la puissance de sortie de toutes les unités de production en ligne qui minimise le coût total du carburant, tout en satisfaisant à toutes les contraintes.

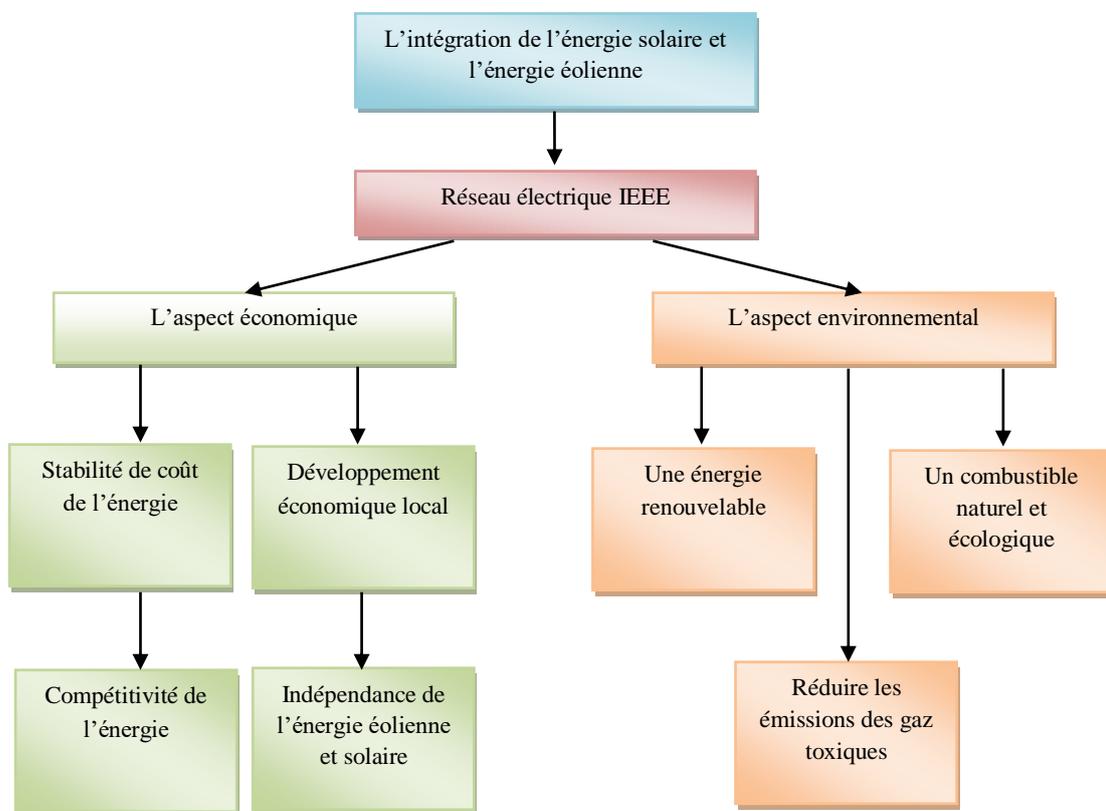
Le DE optimal n'est peut-être pas le meilleur en termes de critères environnementaux. Les polluants gazeux provenant des combustibles fossiles des centrales électriques auront des effets écologiques très néfastes par les émissions. On peut réduire cela par une répartition appropriée de la charge parmi les différentes unités de production des centrales. Mais cette répartition de la charge peut entraîner une augmentation du coût d'exploitation des groupes électrogènes. Il est donc nécessaire de trouver une solution qui donne un résultat équilibré entre les émissions et le coût. Cela peut être réalisé par le problème Combined Economic Emission Dispatch.

La programmation quadratique est l'un des algorithmes modernes. Elle a prouvé sa robustesse dans la résolution de problèmes d'optimisation non linéaire. La technique QP peut générer des solutions de haute qualité dans un temps de calcul plus court et une caractéristique de convergence stable par rapport les autres méthodes. Dans ce chapitre :

1- Nous avons traité le problème d'optimisation de la fonction d'émission des gaz toxiques et la fonction de coût vers l'environnement sur un réseau IEEE avec 6 unités, et une demande de charge de 500 MW, 700MW, 900MW.

2- Dans notre cas nous avons utilisé des coefficients Bmn pour résoudre ce problème.

Les essais seront réalisés sur des réseaux électriques de petite et moyenne échelle. Cet algorithme a été développé dans l'outil MATLAB.



**Figure IV.1** Diagramme schématisant l'effet de l'intégration des énergies renouvelables sur le réseau électrique

## IV.2 Cas de base :

Nous avons appliqué notre méthode de calcul quadratique programme (QP) dans le réseau IEEE avec 6 unités, les coefficients de coût du carburant ( $a_i, b_i, c_i$ ), limites min et max de puissance ( $P_{min}, P_{max}$ ) et les coefficients d'émission de gaz

$(f_i, g_i, h_i)$  des 6 générateurs ( $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ ) sont données dans le tableau IV.1 et le tableau IV.2 respectivement.

Fcost (\$/h), E (kg/h), PI sont le coût de production, les émissions des gaz et les pertes de transmission successivement.

**Tableau IV.01** Les coefficients de coût du carburant et limites de puissance

Unité	coefficients de coût du carburant			$P_{imin}$	$P_{imax}$
	$a_i$	$b_i$	$c_i$		
P <sub>1</sub>	0.15247	38.53973	756.79886	10	125
P <sub>2</sub>	0.10587	46.15916	415.32513	10	150
P <sub>3</sub>	0.02803	40.39655	1049.9977	35	225
P <sub>4</sub>	0.03546	38.30553	1243.5311	35	120
P <sub>5</sub>	0.02111	36.32782	1658.5696	130	325
P <sub>6</sub>	0.01799	38.27041	1356.6592	125	315

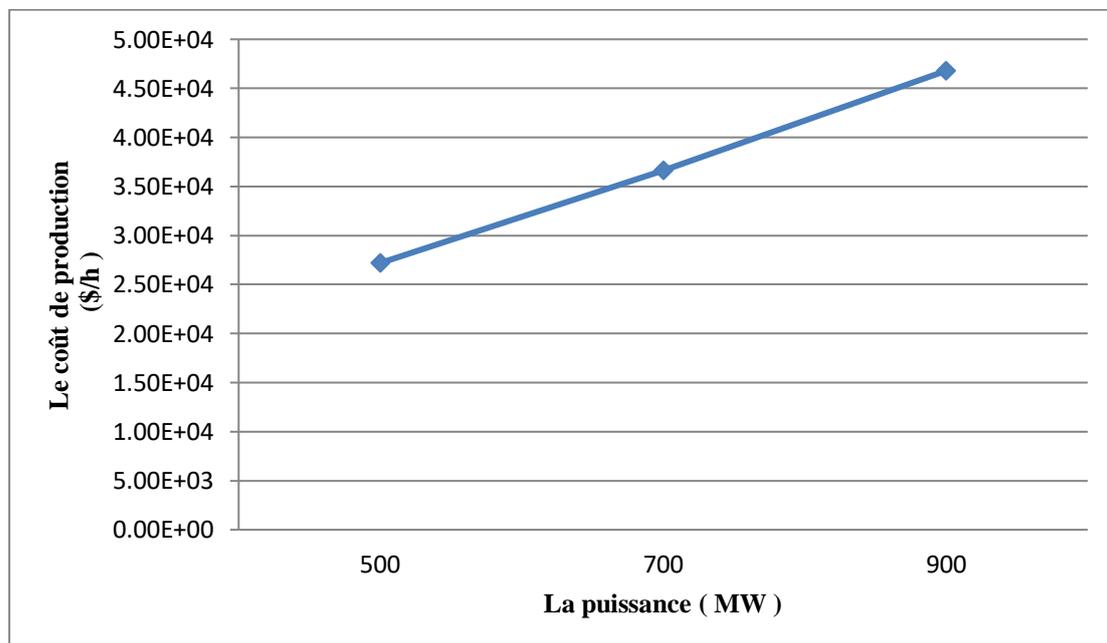
**Tableau IV.02** Les coefficients d'émission de gaz

Unité	Coefficients d'émission de gaz		
	$f_i$	$g_i$	$h_i$
P <sub>1</sub>	0.00420	0.3300	13.86
P <sub>2</sub>	0.00420	0.3300	13.86
P <sub>3</sub>	0.00683	-0.5455	40.267
P <sub>4</sub>	0.00683	-0.5455	40.267
P <sub>5</sub>	0.00460	-0.5112	42.9
P <sub>6</sub>	0.00460	-0.5112	42.9

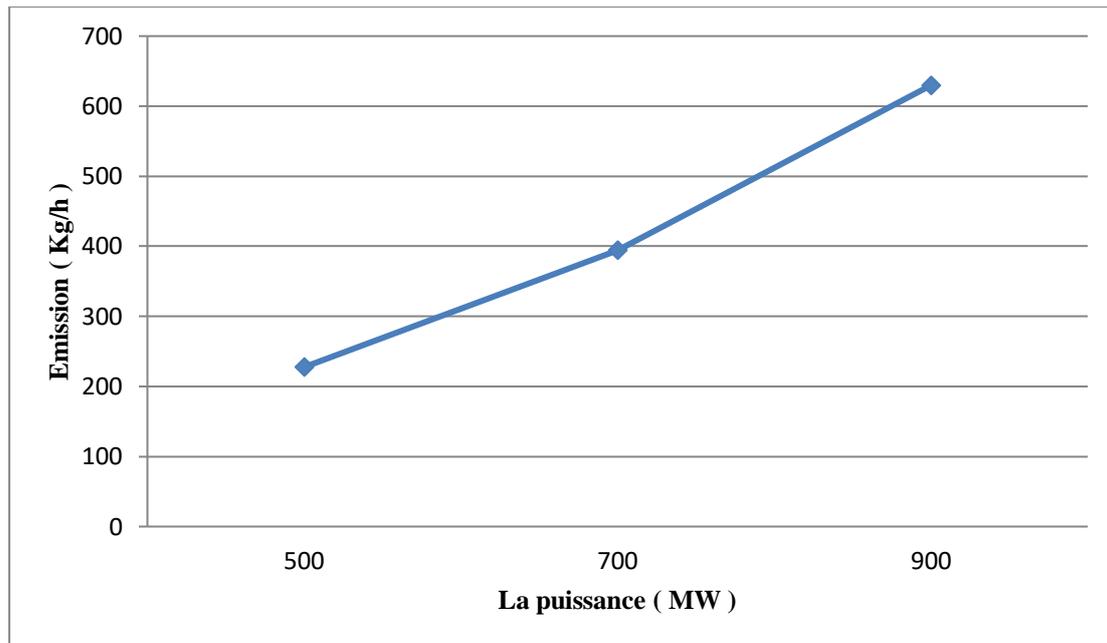
**Tableau IV.03** Résultats du problème de la répartition économique et des émissions combinées (CEED) pour le système à 6 unités utilisant quadratique programme (QP)

Unité	Puissance		
	500 MW	700 MW	900 MW
P <sub>1</sub>	30.6557	57.4991	85.1314
P <sub>2</sub>	23.5524	56.2275	90.1964
P <sub>3</sub>	88.2411	116.8274	145.1407
P <sub>4</sub>	89.3986	117.3384	145.0366
P <sub>5</sub>	135.4343	177.3017	218.4965
P <sub>6</sub>	132.9353	175.4284	217.2693
Fcost (\$/h)	2.7191e+04	3.6624e+04	4.6792e+04
E (kg/h)	227.5599	394.1233	629.7719
PI	0.2174	0.6225	1.2709

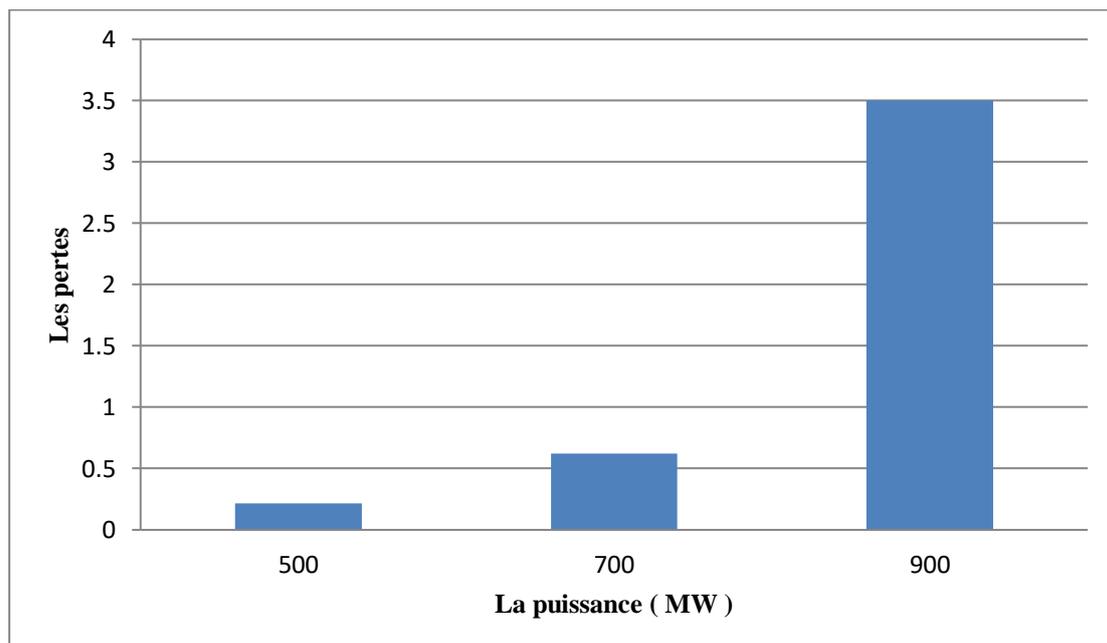
Le tableau IV.3 montre la répartition de la charge entre les générateurs en fonction de la demande du système pour la fonction d'objectif de coût de production, la fonction d'émission et les pertes.



**Figure IV.2** Le coût de production en fonction de puissance



**Figure IV.3** Les émissions en fonction de puissance



**Figure IV.4** Les pertes en fonction de puissance

### Interprétation

Les figures IV.2, IV.3 et IV.4 ci-dessus présentent le coût de production, les émissions et les pertes en fonction de puissance respectivement. On remarque que le coût  $2.7191e+04$  \$/h, l'émission 227.5599 kg/h et les pertes 0.2174 sont des valeurs optimales dans la charge de 500 MW que les autres charges 700 MW, 900 MW.

**IV.3 L'intégration de l'énergie solaire :** dans cette partie, nous avons fait l'intégration de l'énergie solaire (unité P<sub>7</sub>) dans le réseau IEEE avec 6 unités (P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub>, P<sub>5</sub>, P<sub>6</sub>) et 41 lignes.

**Tableau IV.04** La puissance minimale et maximale et les coefficients d'une source solaire

Les Cas	$P_{min}=P_{max}$ ( MW)	Les coefficients de source solaire (\$/kWh)
1	20	0.22
2	25	0.23
3	30	0.24
4	35	0.25
5	40	0.27

**Tableau IV.05** Résultats du CEED avec l'énergie solaire pour une demande de 700 MW et Cs1= 0.22\$/kWh

Cs1=0.22\$/kWh, P=700MW	
P <sub>1</sub>	54.8375
P <sub>2</sub>	52.9751
P <sub>3</sub>	113.9645
P <sub>4</sub>	114.5382
P <sub>5</sub>	173.0942
P <sub>6</sub>	171.1672
P <sub>7</sub>	20.0000
Fcost(\$/h)	3.5654e+04
E (kg/h)	404.3148
PI	0.5722

**Tableau IV.06** Résultats du CEED avec l'énergie solaire pour une demande de 700 MW et  $Cs2=0.23\$/kWh$ 

$Cs2=0.23\$/kWh, P=700MW$	
P <sub>1</sub>	54.2176
P <sub>2</sub>	52.1496
P <sub>3</sub>	113.2378
P <sub>4</sub>	113.8274
P <sub>5</sub>	172.0261
P <sub>6</sub>	170.0797
P <sub>7</sub>	25.0000
Fcost(\$/h)	3.5412e+04
E (kg/h)	399.4411
PI	0.5352

**Tableau IV.07** Résultats du CEED avec l'énergie solaire pour une demande de 700 MW et  $Cs3=0.24\$/kWh$ 

$Cs3=0.24\$/kWh, P=700MW$	
P <sub>1</sub>	53.5054
P <sub>2</sub>	51.3493
P <sub>3</sub>	112.5334
P <sub>4</sub>	113.1385
P <sub>5</sub>	170.9909
P <sub>6</sub>	169.0303
P <sub>7</sub>	30.0000
Fcost(\$/h)	3.5172e+04
E (kg/h)	394.6732
PI	0.5479

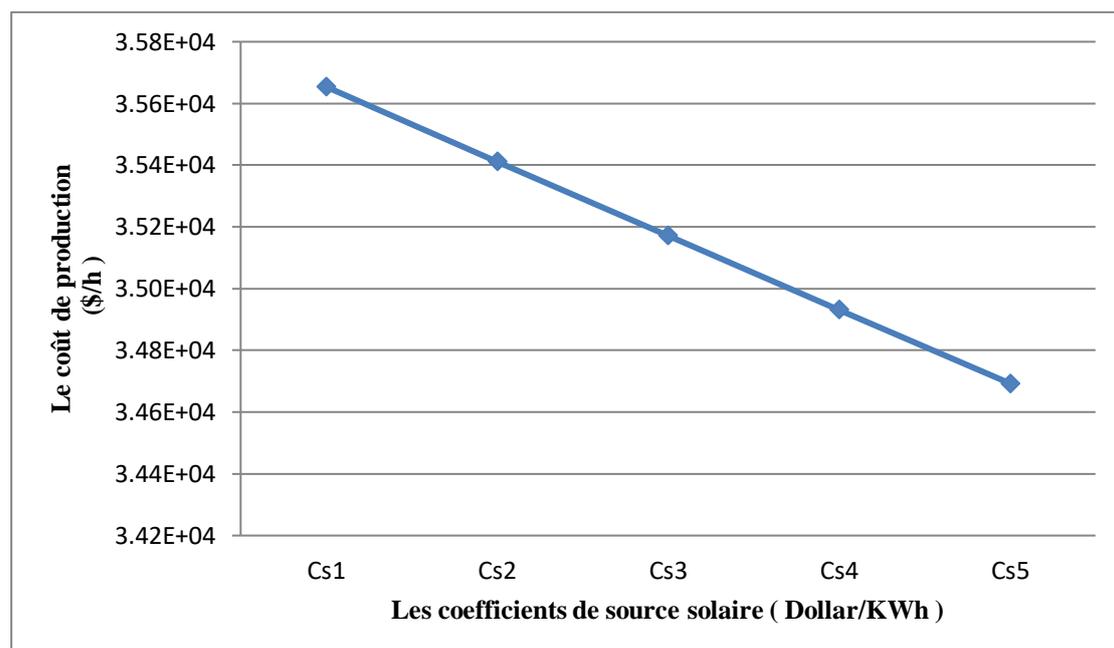
**Tableau IV.08** Résultats du CEED avec l'énergie solaire pour une demande de 700 MW et  $Cs4=0.25\$/kWh$ 

$Cs4=0.25\$/kWh, P=700MW$	
P <sub>1</sub>	52.8391
P <sub>2</sub>	50.5365
P <sub>3</sub>	111.8180
P <sub>4</sub>	112.4387
P <sub>5</sub>	169.9394
P <sub>6</sub>	167.9642
P <sub>7</sub>	35.0000
Fcost(\$/h)	3.4932e+04
E (kg/h)	389.9180
PI	0.5359

**Tableau IV.09** Résultats du CEED avec l'énergie solaire pour une demande de 700 MW et  $Cs5=0.27\$/kWh$

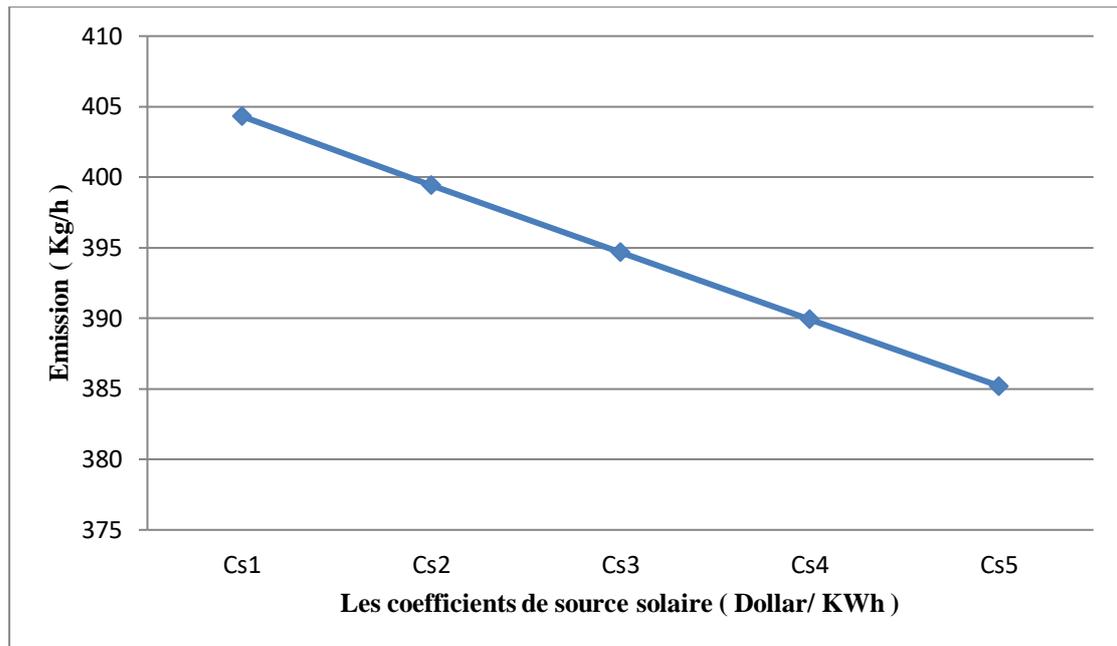
Cs5=0.27\$/kWh, P=700MW	
P <sub>1</sub>	52.1726
P <sub>2</sub>	49.7238
P <sub>3</sub>	111.1026
P <sub>4</sub>	111.7390
P <sub>5</sub>	168.8880
P <sub>6</sub>	166.8982
P <sub>7</sub>	40.0000
Fcost(\$/h)	3.4693e+04
E (kg/h)	385.2066
PI	0.5241

Les tableaux IV.5, IV.6, IV.7, IV.8, IV.9 montrent les différents coefficients de source solaire avec une seule charge de 700 MW sur un réseau de 7 unités avec différents valeurs de coût de production, les émissions des gaz et les pertes.



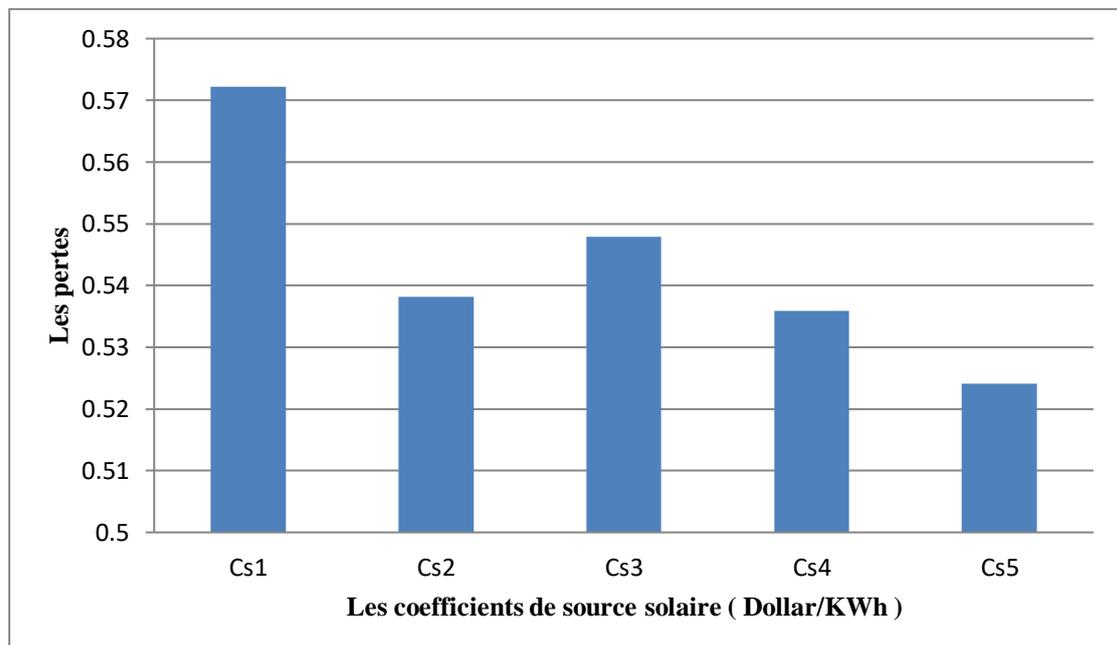
**Figure IV.5** Le coût de production en fonction des coefficients de source solaire

Sur la figure IV.5 nous pouvons voir que l'énergie solaire diminue le coût de production de 3.5412e+04 \$/h à 3.4693e+04 \$/h pour  $Cs1=0.22\$/kWh$ ,  $Cs5=0.27\$/kWh$  respectivement.



**Figure IV.6** L'émission en fonction des coefficients de source solaire

La figure IV.6 ci-dessus montre la diminution d'émission de gaz par l'intégration d'énergie solaire.



**Figure IV.7** Les pertes en fonction des coefficients de source solaire

Sur la figure IV.7 ci-dessus nous pouvons voir l'effet de l'énergie solaire diminuer les pertes.

**Tableau IV.10** Résultats du CEED avec l'énergie solaire pour des demandes de 500MW, 700 MW, 900MW et  $Cs5= 0.27\$/kWh$ 

	P=500MW	P=700MW	P=900MW
P <sub>1</sub>	24.4769	52.1726	78.6781
P <sub>2</sub>	16.2035	49.7238	82.2827
P <sub>3</sub>	81.5961	111.1026	139.7624
P <sub>4</sub>	82.8782	111.7390	139.7705
P <sub>5</sub>	130.0000	168.8880	211.0076
P <sub>6</sub>	125.0000	166.8982	209.609
P <sub>7</sub>	40.0000	40.0000	40.0000
Fcost (\$/h)	2.5383e+04	3.4693e+04	4.4676e+04
E (kg/h)	233.0233	385.2066	607.8502
PI	0.1547	0.5241	1.1022

Le tableau IV.10 montre les résultats de différentes demandes (500 MW, 700MW et 900 MW) obtenus concernant le coût de production, l'émission de gaz et les pertes. On constate que les meilleures valeurs obtenues sont celles obtenues par la charge de 500 MW.

### Interprétation

D'après les résultats listés sur les tableaux et les figures obtenus par la méthode QP on remarque l'injection de l'énergie solaire dans le réseau électrique diminue le coût de production pour  $Cs1=0.22\$/kWh$  de sa capacité on peut économiser  $3.5654e+04$  \$/h, l'émission de gaz avec 404.3148 kg/h et les pertes avec 0.5722, et nous pouvons économiser jusqu'à  $3.4693e+04$  \$/h (moins que le coût du carburant sans énergie solaire  $3.6624e+04$  \$/h), l'émission de gaz 385.2066 kg/h (moins que l'émission de gaz sans énergie solaire 394.1233) et les pertes avec 0.5241 (moins que les pertes sans énergie solaire 0.6225) pour  $Cs5=0.27\$/kWh$ .

**IV.4 L'intégration de l'énergie éolienne :** dans cette partie, nous avons fait l'intégration de l'énergie éolienne (unité P<sub>7</sub>) dans le réseau IEEE avec 6 unités (P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub>, P<sub>5</sub>, P<sub>6</sub>).

**Tableau IV.11** La puissance minimal et maximale et le coefficient d'une source éolienne

Les Cas	$P_{min}=P_{max}$ ( MW)	Les coefficients de source éolienne (\$/kWh)
1	5	3.7
2	10	3.7
3	15	3.7
4	20	3.7

**Tableau IV.12** Résultats du CEED avec l'énergie éolienne pour une demande de 700 MW avec le coefficient éolienne  $C_e=3.7\$/MWh$  et  $P_{min}=P_{max}= 5MW$

Ce=3.7\$/MWh, P=700MW	
P <sub>1</sub>	54.8340
P <sub>2</sub>	55.4143
P <sub>3</sub>	116.1116
P <sub>4</sub>	116.6383
P <sub>5</sub>	176.2497
P <sub>6</sub>	174.3619
P <sub>7</sub>	5.0000
Fcost(\$/h)	3.6398e+04
E (kg/h)	419.1055
PI	0.6097

**Tableau IV.13** Résultats du CEED avec l'énergie éolienne pour une demande de 700 MW avec le coefficient éolienne  $C_e=3.7\$/MWh$  et  $P_{min}=P_{max}= 10MW$

Ce=3.7\$/MWh, P=700MW	
P <sub>1</sub>	56.1687
P <sub>2</sub>	54.6012
P <sub>3</sub>	115.3959
P <sub>4</sub>	115.9382
P <sub>5</sub>	175.1978
P <sub>6</sub>	173.2954
P <sub>7</sub>	10.0000
Fcost(\$/h)	3.6173e+04
E (kg/h)	414.1315
PI	0.5971

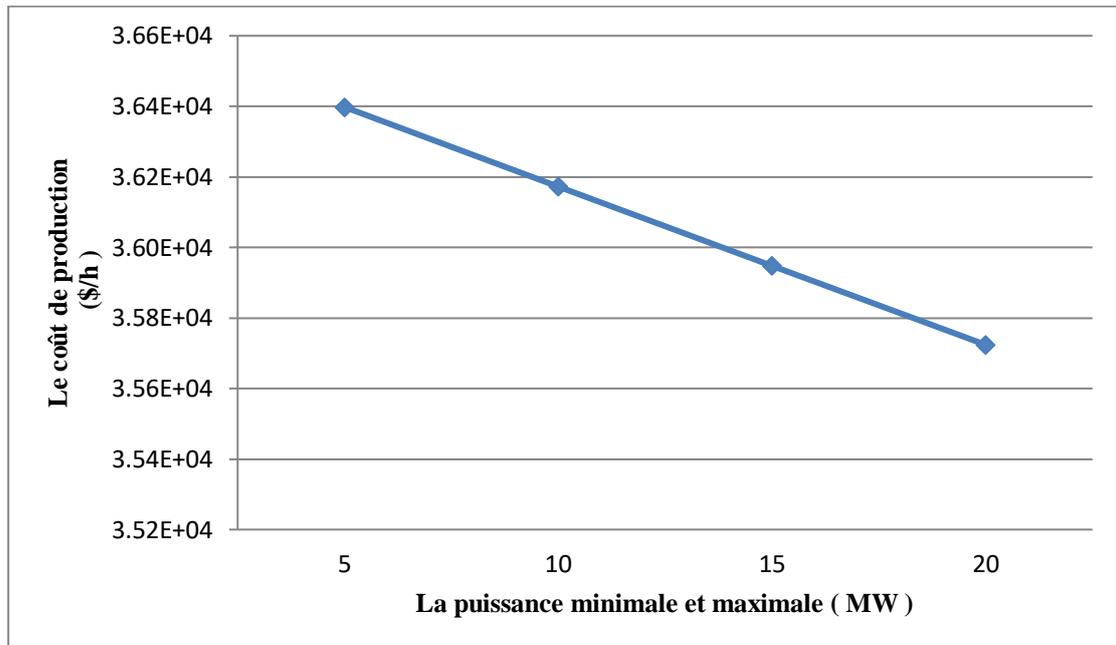
**Tableau IV.14** Résultats du CEED avec l'énergie éolienne pour une demande de 700 MW avec le coefficient éolienne  $C_e=3.7\$/MWh$  et  $P_{min}=P_{max}= 15MW$

Ce=3.7\$/MWh, P=700MW	
P <sub>1</sub>	55.5032
P <sub>2</sub>	53.7881
P <sub>3</sub>	114.6802
P <sub>4</sub>	115.2382
P <sub>5</sub>	174.1459
P <sub>6</sub>	172.2290
P <sub>7</sub>	15.0000
Fcost(\$/h)	3.5948e+04
E (kg/h)	409.2013
PI	0.5846

**Tableau IV.15** Résultats du CEED avec l'énergie éolienne pour une demande de 700 MW avec le coefficient éolienne  $C_e=3.7\$/MWh$  et  $P_{min}=P_{max}= 20MW$

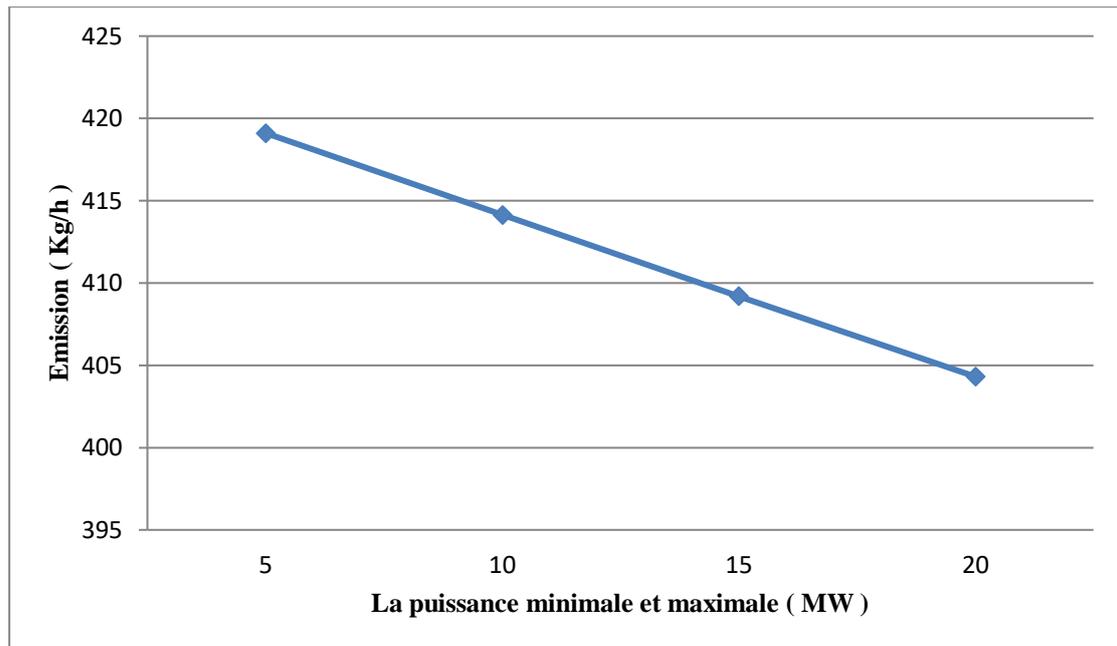
Ce=3.7\$/MWh, P=700MW	
P <sub>1</sub>	54.8375
P <sub>2</sub>	52.9751
P <sub>3</sub>	113.9645
P <sub>4</sub>	114.5382
P <sub>5</sub>	173.0942
P <sub>6</sub>	171.1627
P <sub>7</sub>	20.0000
Fcost(\$/h)	3.5724e+04
E (kg/h)	404.3148
PI	0.5722

Les tableaux IV.12, IV.13, IV.14, IV.15, montrent les différentes puissances minimales et maximales avec un seul coefficient de source éolienne et une seule charge de 700 MW sur un réseau de 7 unités avec différentes valeurs de coût de production, les émissions des gaz et les pertes.



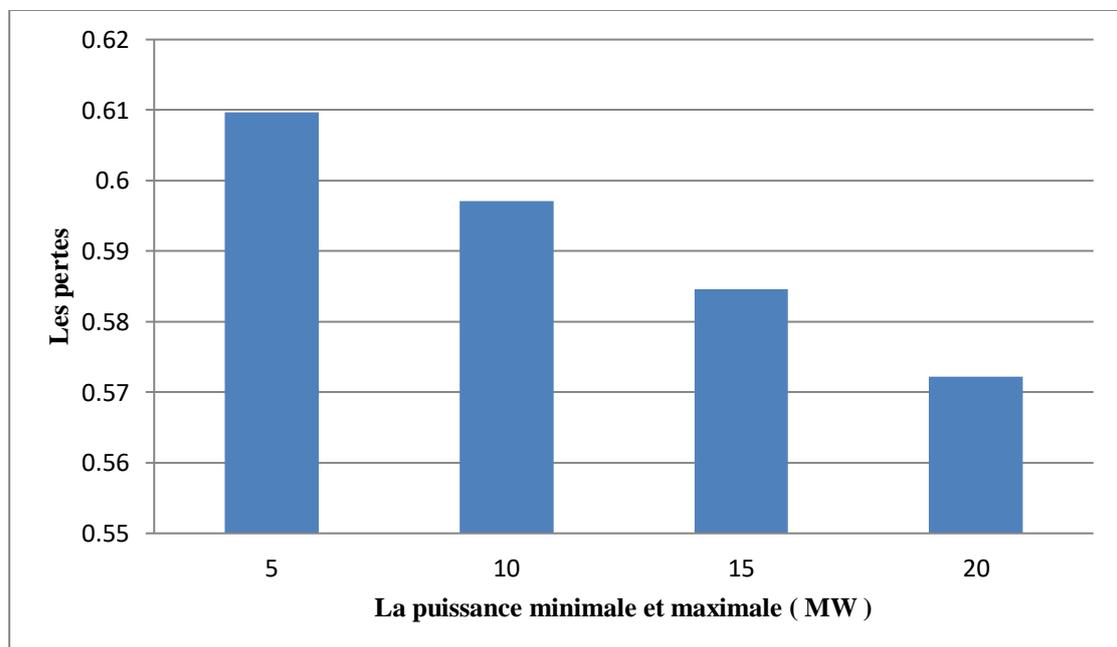
**Figure IV.8** Le coût de production en fonction de la puissance minimale et maximale de source éolienne

Sur la figure IV.8 nous pouvons voir que l'énergie éolienne diminue le coût de production de  $3.6398 \times 10^4$  \$/h à  $3.5744 \times 10^4$  \$/h pour  $P_{\min}=P_{\max}= 5\text{MW}$ ,  $P_{\min}=P_{\max}= 20\text{MW}$  respectivement.



**Figure IV.9** L'émission en fonction de la puissance minimale et maximale de source éolienne

La figure IV.9 ci-dessus montre la diminution d'émission de gaz par l'intégration d'énergie éolienne.



**Figure IV.10** Les pertes en fonction de la puissance minimale et maximale de source éolienne

Sur la figure IV.10 ci-dessus nous pouvons voir l'effet de l'énergie éolienne diminuer les pertes.

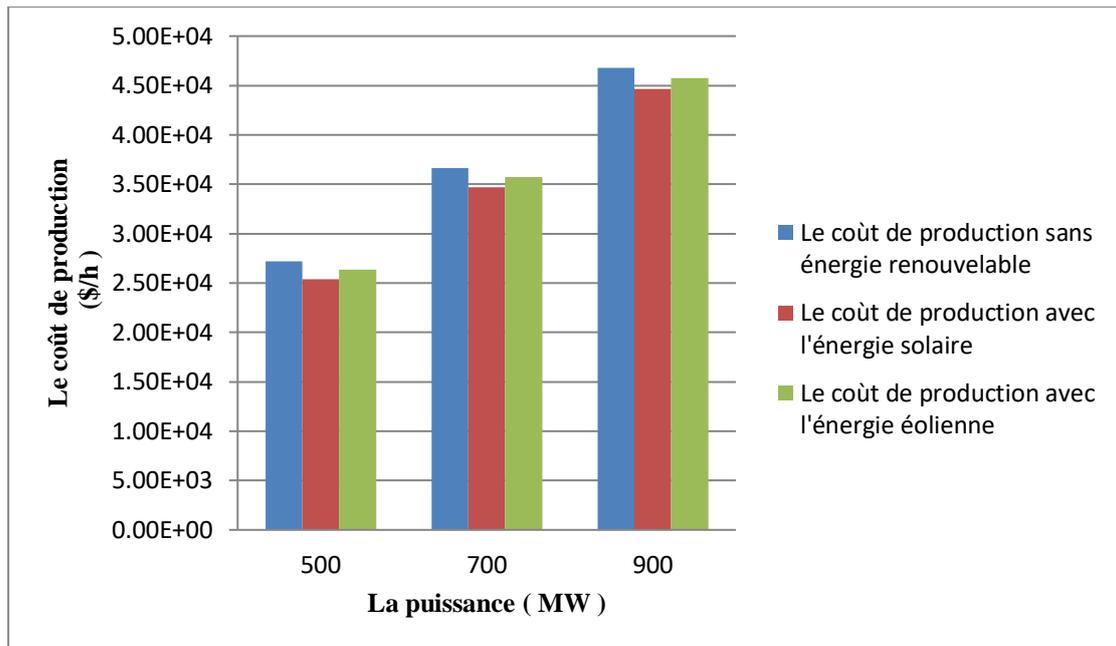
**Tableau IV.16** Résultats du CEED avec l'énergie éolienne pour des demandes de 500MW, 700 MW, 900MW et  $P_{\min}=P_{\max}=20\text{MW}$  avec le même coefficient  $C_e=3.7\$/\text{MWh}$

	P=500MW	P=700MW	P=900MW
$P_1$	27.3563	54.8375	81.3113
$P_2$	20.6933	52.9751	85.5441
$P_3$	85.5555	113.9645	142.6332
$P_4$	86.7512	114.5382	142.5784
$P_5$	131.3367	173.0942	215.2266
$P_6$	128.8258	171.1627	213.8782
$P_7$	20.0000	20.0000	20.0000
Fcost (\$/h)	2.6375e+04	3.5724e+04	4.5775e+04
E (kg/h)	244.9474	404.3148	633.9789
PI	0.1588	0.5722	1.1718

Le tableau IV.16 montre les résultats de différentes demandes (500 MW, 700MW et 900 MW) obtenus concernant le coût de production, l'émission de gaz et les pertes. On remarque que les valeurs sont optimales. On constate que les meilleures valeurs obtenu sont celles obtenu par la charge de 500 MW.

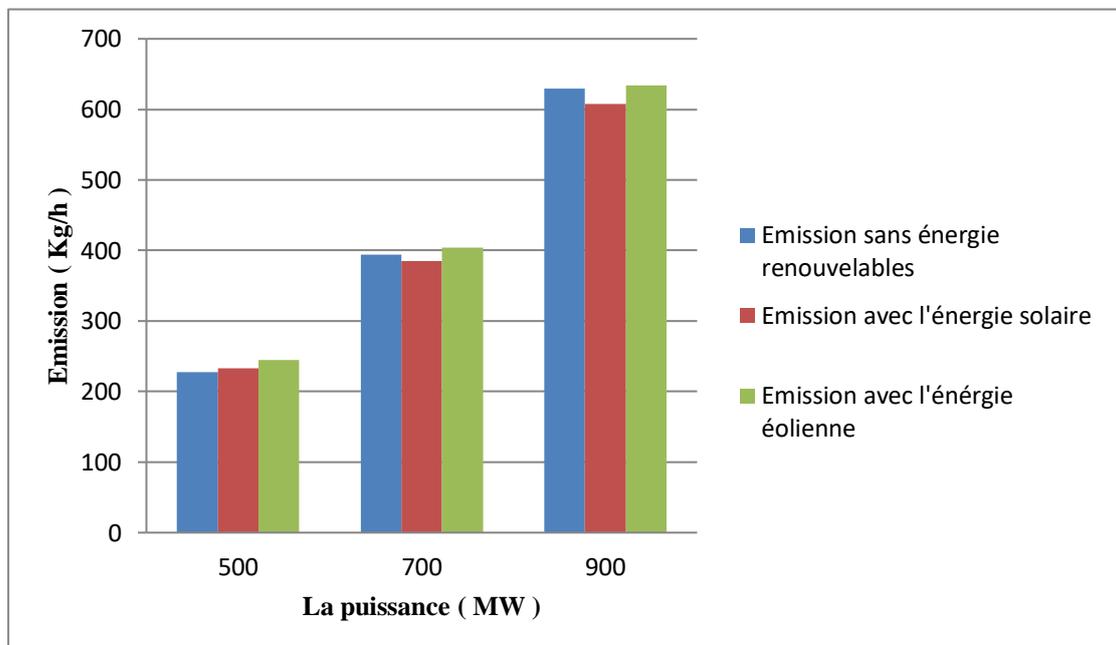
### Interprétation

D'après les résultats listés sur les tableaux et les figures obtenus par la méthode QP on remarque l'injection de l'énergie éolienne dans le réseau électrique diminuer le coût de production pour  $P_{\min}=P_{\max}= 5\text{MW}$  de sa capacité on peut économiser  $3.6398e+04$  \$/h, l'émission de gaz avec 419.1055 kg/h et les pertes avec 0.6097, et nous pouvons économiser jusqu'à  $3.5724e+04$  \$/h ( moins que le cout du carburant sans énergie éolienne  $3.6624e+04$  \$/h), l'émission de gaz 404.3148 kg/h (moins que l'émission de gaz sans énergie éolienne 394.1233) et les pertes avec 0.5722 (moins que les pertes sans énergie éolienne 0.6225) pour  $P_{\min}=P_{\max}= 20\text{MW}$ .



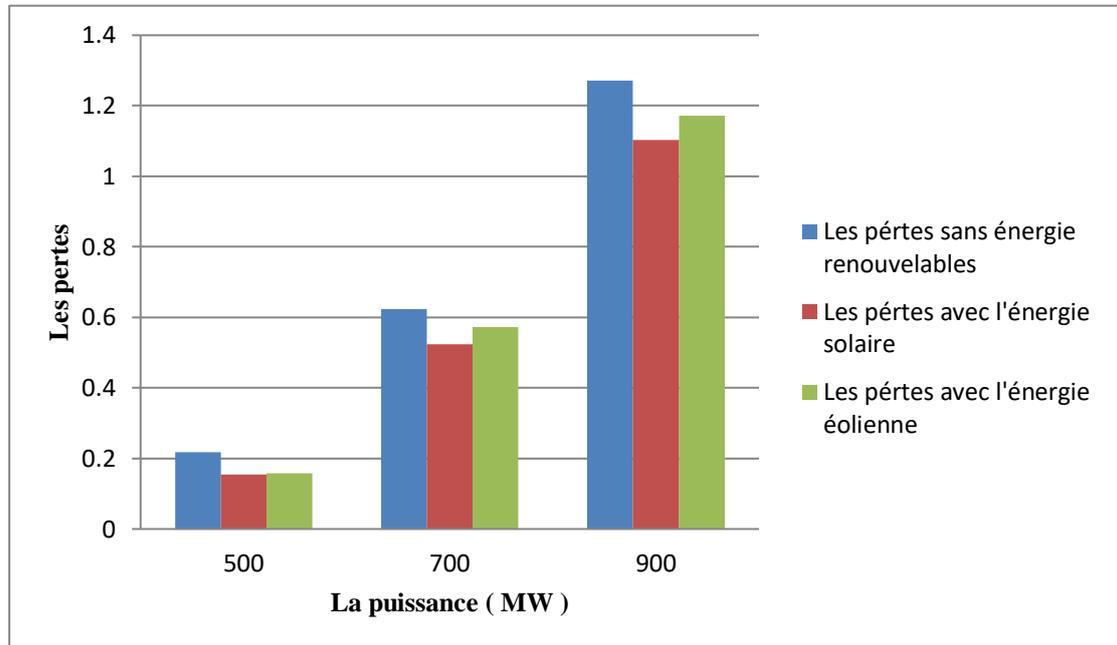
**Figure IV.11** Les coûts de la production des trois essais utilisés

Pour la figure IV.11 l'axe bleu présente le coût de production sans énergie renouvelable, l'axe rouge présente le coût de production avec l'énergie solaire, l'axe vert présente le coût de production avec l'énergie éolienne. On note que l'augmentation de la demande augmente le coût de production.



**Figure IV.12** Les émissions des trois essais utilisés

La figure IV.12 montre l'augmentation des émissions sans énergie renouvelable et l'augmentation des émissions avec l'énergie solaire, éolienne, à cause de l'augmentation des charges.



**Figure IV.13** Les pertes des trois essais utilisés

La figure IV.13 montre les différentes pertes de quatre essais utilisées. On note que l'augmentation des demandes des charges augmente les différentes pertes.

## Interprétation

On conclut que les énergies renouvelables jouent un rôle très important pour diminuer le coût de production ainsi les émissions des gaz toxique.

## IV.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a appliqué la méthode de programme quadratique (PQ) dans le réseau IEEE avec 6 unités.

Dans ce chapitre, nous avons essayé de trouver:

- La solution optimale pour le coût minimal de la production.
- Les émissions minimales des gazes.
- La solution combinée entre les solutions économiques et environnementales.

Le programme quadratique est utilisé dans ce travail pour déterminer le problème multi- objectif de dispatching économique combiné avec la considération des émissions des gazes.

Le problème est défini comme un problème d'optimisation à plusieurs objectifs, afin de réduire le coût de production et le taux d'émission.

Les résultats obtenus révèlent l'efficacité et l'utilité de la méthode de programme quadratique dans les deux aspects « le dispatching économique» et « le dispatching environnementales» dans les systèmes de production.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Dans ce mémoire le travail de recherche présenté est une contribution au micro-réseau et l'aspect économique ainsi que la distribution d'énergie électrique produite par les centrales électriques où une application d'un algorithme (QP), a été présentée dans le but de résoudre le Problème de Combined Economic Emission Dispatch (CEED).

L'impact environnemental des centrales électriques à base des fossiles qui se caractérise par la pollution et le réchauffement planétaire d'une part, et d'autre part la croissance de la demande sur l'énergie électrique qui a été toujours en évolution et une nécessité permanente des clients, qui rencontrent souvent l'incapacité des producteurs d'électricité à satisfaire cette exigence.

Ces raisons ont poussé les producteurs d'électricité à trouver une autre solution alternative qui est l'utilisation des ENR pour satisfaire le besoin en énergie qualitativement et quantitativement.

Plusieurs modèles de tailles différentes ont été choisis pour valider notre algorithme qui est des réseaux test 6 unités comprenant six générateurs thermiques conventionnels, un parc éolien et un système solaire photovoltaïque, le programme est développé sous l'environnement de MATLAB version.

En perspective on peut faire :

- ✓ La comparaison entre la méthode quadratique programme (QP) et la méthode de optimisation par Essaim de Particules (PSO) pour résoudre le problème de dispatching économique et environnementale.
- ✓ Intégration les séparateurs des gaz dans les centrales thermique et trouver ses modélisation mathématiques.

# Références

## **Bibliographie :**

- [1] S. Krishnamurthy, "Development of Decomposition Methods for Solution of a Multiarea Power Dispatch Optimisation Problem", doctoral thesis, (2013).
- [2] BENYAZA Mohamed Salah, "Répartition optimale des puissances dans un réseau électrique par l'algorithme génétique" Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2016.
- [3] L. Hamane, " Bulletin des Energies Renouvelables ", Centre de Développement des Energies Renouvelables CDER, Juin 2003, Algérie.
- [4] R. Bouddou, F. Benhamida, A. Zeggai, and M. Belgacem, "Impact of Wind Power Generation Integration on a double-sided Competitive Electricity Market, 2020.
- [5] F. Benhamida, I. Ziane, S. Souag, Y. Salhi, and B. Dehiba, "A quadratic programming optimization for dynamic economic load dispatch: Comparison with GAMS," 2013 3rd Int. Conf. Syst. Control. ICSC 2013, pp. 625–630, 2013, doi: 10.1109/ICoSC.2013.6750926,2020.
- [6] BEN BORDI Samir," Optimisation Multi Objectif de L'écoulement de Puissance" Mémoire de Master ,Université Mohamed Khider -Biskra,2015.
- [7] Motilal Bhoje, Mahesh H. pandya, Swati N. Purohit, Pradeep Jangir, Indrajit N. Trivedi, Narottam Jangir, "Energy Management of Renewable Energy Sources in a Microgrid using Cuckoo Search Algorithm", SCEECs-IEEE-2016.
- [8] S. Chowdhury, S.P. Chowdhury and P. Crossley, "Microgrids and Active Distribution Networks, ". London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [9] M.laouar,F.ake1,F.bendib,M.chikh, "Residential Microgrid Load Management and

Optimal Control on control in grid Connected and Islanded mode'', conf IEEE, 2020.

[10] M. Lopez, " Contribution à l'Optimisation d'un Système de Conversion Eolien Pour une Unité de Production Isolée ", Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, 2008.

[11] O. Gergaud, " Modélisation Energétique et Optimisation Economique d'un Système de Production Eolien et Photovoltaïque Couplé au Réseau et associé à un Accumulateur'', Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Décembre 2002.

[12] H Kanchev, " Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain'', thèse soutenue a l'école centrale de lille, le 24 janvier 2014.

[13] Hydro power, Alternative Energy News, 2010, [réf de janvier 2013], disponible sur: <http://www.alternative-energy-news.info/technology/hydro/>.

[14] S. Benreguia, "Techniques de production de l'électricité en Algérie : Dominance des combustibles fossiles'', Portail Algérien des Energies Renouvelables, août 2012.

[15] Rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement, CMED de l'ONU, présidée par Madame Gro Harlem Brundtland Avril 1987.

[16] Renewable Energy policy network for the 21st century 2016 Rapport sur le statut mondial des énergies renouvelables 2016, [www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR\\_2016\\_KeyFindings\\_French.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings_French.pdf).

[17] G. R. Timilsina, L. Kurdgelashvili et P. A. Narbel, "Solar energy: Markets, economics and policies, " Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, n° 11, pp. 449-465, 2012.

[18] France Agrimer, 2012, La méthanisation état des lieux et perspectives de développement, n° 1 “ Biomasse “,12 p., disponible sur : <http://www.franceagrimer.fr/content/download/16180/122245/file/methanisation-en-france.pdf>.

[19] Kazuhisa Miyamoto, “ Chapter 1 - Biological energy production “ , sur Renewable biological systems for alternative sustainable energy production (FAO Agricultural Services Bulletin - 128) ,FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1997 (consulté le 2 février 2014).

[20] F.Z. Kedaid “ Développement de la base de données géothermiques de l’Algérie par un système d’information géographique “ revue Centre de Développement des Énergies Renouvelables, accepté le 21 Novembre 2006).

[21] Centre d'Information sur l'Énergie et l'Environnement, Les énergies renouvelables, la géothermie. Rapport d’activité 2005.

[22] Amory B. LOVINS, stratégie énergétiques planétaires, édition Christian Bourgeois 1975.

[23] Labouret A, “ Énergie solaire photovoltaïque “, Dunod, 3 e éditions, Paris2006. Ch1.

[24] F. Bouchtouche cherfa “ Étude et réalisation d’une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT ”. Mémoire de magister, École National Polytechnique El-Harrach, 2004.

[25] M. Angel Cid Pastor “ conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques “ Thèse Docteur de l’institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.

- [26] O. Gergaud, “ Modélisation Energétique et Optimisation Economique d'un Système de Production Eolien et Photovoltaïque Couplé au Réseau et associé à un Accumulateur”, Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Décembre 2002.
- [27] Ressources naturelles du canada, Les systèmes photovoltaïques (guide de l'acheteur), division de l'énergie renouvelable et électrique, n°M92-28/2001F, Ottawa, Canada 2002.
- [28] Hadj Belacemi Mohamed “ Modélisation et Etude Expérimentation d'un capteur solaire non vitré et perforé ” - thèse de MASTER, Université de Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 06/07/2011.
- [29] Pierre Haessig. “ Dimensionnement et gestion d'un stockage d'énergie pour l'atténuation des incertitudes de production éolienne “. Énergie électrique. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2014.
- [30] Dhaker Abbes. “ Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens- photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome ” [En ligne]. Thèse Génie électrique. Poitiers : Université de Poitiers, 2012.
- [31] Redjem Radia, “ Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne “, Mémoire de Magistère, Université Mentouri de Constantine, Département d'Electrotechnique, 04/07/2009.
- [32] Sare, C.B.; Paul, R.M. Peaceful coexistence: Independent microgrids are coming. In Public Utilities Fortnightly; University of Connecticut: Reston, VA, USA, 2013; Available online: <https://works.bepress.com/bronin/>. (accessed on 14 December 2019).
- [33] Carpintero-Rentería, M.; Santos-Martín, D.; Guerrero, J.M. Microgrids Literature Review through a Layers Structure. *Energies* **2019**, *12*, 4381. [CrossRef].
- [34] C. Clastres, “Smart grids: another step towards competition, energy security and climate change objectives”, *Energy Policy*, 39:5399–408, 2011.

- [35] S. Némoz, “ Vers une énergie intelligente pour la mobilité universitaire? Le cas de la recherche-action Smart Campus ” Vertigo la revue électronique en sciences de l'environnement, Vol.14, N°3, 2014.
- [36] N. Hadjsaid, J. C. Sabonnadière, “ Des réseaux électriques aux Smartgrids ” Encyclopédie de l'énergie, Art.073, 2015.
- [37] E. Hossain, Z. Han, H. Vincent Poor, ”Smart grid communications and networking,” Cambridge University Press, 978-1-107-01413-8, Part-I: Communication architectures and models for smart grid, 2013.
- [38] Julien M, “ les smart grids, les réseaux électriques du futur, Une première approche ”, [www.adec.fr](http://www.adec.fr)-Julien Monereau. 2011.
- [39] S. Némoz, “ Vers une énergie intelligente pour la mobilité universitaire? Le cas de la recherche-action Smart Campus ” Vertigo la revue électronique en sciences de l'environnement, Vol.14, N°3, 2014.
- [40] M. D. Ilic, “From hierarchical to open access electric power systems”, Proceedings of the IEEE 95 (5) 1060–1084, 2010.
- [41] C.E. Capovilla, I.R.S. Casella, A.J. Sguarezi Filho, J.L. Azcue-Puma, R.V. Jacomini, E. Ruppert, “A wind energy generator for smart grid applications using wireless coded neuro-fuzzy power control”, Computers and Mathematics with Applications (68) 2112–2123, 2014.
- [42] M. Drouineau, ”Modélisation prospective et analyse spatio-temporelle : intégration de la dynamique du réseau électrique,” Thèse de doctorat, MINES ParisTech, France, 2011
- [43] G. Guérard, ” Optimisation de la diffusion de l'énergie dans les Smart Grids,” Thèse de doctorat, Université de Versailles, France, 2014.
- [44] G. Basso ,” Approche à base d'agents pour l'ingénierie et le contrôle de micro réseaux,” Thèse de doctorat,, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, France, 2013.

- [45] Anthony R. Metke and Randy L. Ekl, ‘‘ Security Technology for Smart Grid Networks’’. 2010.
- [46] M. D. Ilic, ‘‘From hierarchical to open access electric power systems’’, Proceedings of the IEEE 95 (5) 1060–1084, 2010.
- [47] J. Bhatt, S. Vipul, J. Omkar, ‘‘ An instrumentation engineer’s review on smart grid: Critical applications and parameters’’ Renewable and Sustainable Energy, Reviews 40, 1217–1239, 2014.
- [48] Boris B, ‘‘ Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur ‘’, thèse doctorat, université de Grenoble. 2011.
- [49] D. M. Vondrasek, ‘‘the future of smart grid technology in the u.s. lodging industry: a delphi study’’ Mémoire de master, the University of Delaware, USA, 2011.
- [50] United States of America Energy Information Administration, ‘‘US electric power industry net generation, 2015, disponible sur: [http://www.eia.doe.gov/cneaf/electricity/epa/epa\\_sum.html](http://www.eia.doe.gov/cneaf/electricity/epa/epa_sum.html)’’, [consulté le: 25 novembre 2016].
- [51] Quang-Dung Ho, Tho Le-Ngoc, ‘‘Handbook of Green Information and Communication Systems ‘’. Chapitre 5 ‘‘Smart Grid Communications Networks: Wireless Technologies, Protocols, Issues, and Standards ‘’. 2013.
- [52] Janaka E, Kithsiri L, Jianzhong W, Akihiko Y et Nick J, ‘‘SMART GRID TECHNOLOGY AND APPLICATIONS ‘’. 2012.
- [53] Bayart M, Conrard B, Chovin A et Michel ROBERT, ‘‘ Techniques de l’Ingénieur : Capteurs et actionneurs intelligents ‘’. 2005.
- [54] Zhang Y et Chen J.L, ‘‘ Wide-Area SCADA System with Distributed Security Framework ‘’. 2012.

- [55] Oddi M, ‘‘ Techniques de l’Ingénieur : Plan de protection des réseaux de distribution publique à moyenne tension : Évolutions récentes et compléments électrotechniques ‘‘. 2011.
- [56] Brice K, Bazmi H, ABB revue ‘‘ Les réseaux électriques du futur ‘‘. 2010.
- [57] Rapport de l’Institut Montaigne, ‘‘Pour des réseaux électriques intelligents ‘‘, [http://www.institutmontaigne.org/medias/documents/rapport\\_reseaux\\_electriques\\_intelligents.pdf](http://www.institutmontaigne.org/medias/documents/rapport_reseaux_electriques_intelligents.pdf). 2012.
- [58] Alibi A, Laib H et Delendi L, ‘‘ Apport des FACTS pour la Compensation Shunt dans un Réseau Electrique: Modélisation et Commande d’un STATCOM ‘‘ 2011.
- [59] Mammeri O, ‘‘ différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans un noeud à charge non linéaire en présence d’un système de compensation de l’énergie ‘‘, thèse magister. 2012.
- [60] Sacha J, ‘‘ Les technologies de Maxwell optimisent radicalement les réseaux électriques ‘‘, [http://www.bilan.ch/techno-exclusif/les-technologies-de-maxwelloptimisent- radicalement-les-reseaux-electriques](http://www.bilan.ch/techno-exclusif/les-technologies-de-maxwelloptimisent-radicalement-les-reseaux-electriques). 2011.
- [61] A Report on Transmission and Distribution in India ,’’ Power Grid India Corporation Limited’’, disponible sur: <http://powergridindia.com>, [consulté le:02 décembre 2016].
- [62] S. Brini, H.H. Abdullah, and A. Ouali, ‘‘ Economic Dispatch for Power System included Wind and Solar Thermal energy’’ Leonardo Journal of Sciences (LJS) , Issue 14, pp. 204-220, 2009.
- [63] R. Balamurugan & S. Subramanian, ‘‘ A Simplified Recursive Approach to Combined Economic Emission Dispatch ‘‘, Electric Power Components and Systems , 36:1, 17-27, 2007.
- [64] H. AliyariReza, E. A. Areyaei,’’ Economic load dispatch with the proposed GA algorithm for large scale system’’, Journal of Energy and Natural Resources; vol 31, pp.1-52014.

- [65] S.Piltan M. Pourakbari-Kasmaei J. R. S. Montavani M. Rashidi-Nejad” An Unproblematic Method to Solve Economic and Emission Dispatch”, 10th International Conference of Environment and Electrical Engineering (EEEIC), pp 1-5, 2011.
- [66] A. Nawaz, N. Saleem, E. Mustafa, “Solving Convex and Non - convex Static and Dynamic Economic Dispatch Problems Using Hybrid Particle Multi- Swarm Optimization”, The Journal Tehni č ki vjesnik - Technical Gazette (TV - TG), 2016. (Accepted).
- [67] I. Othmani, Optimisation multicritère : Fondements et Concepts , Thèse de Doctorat ; Université de Grenoble ; 1998.
- [68] M. F. Hamza, Hwa Jen Yap , I. A. Choudhury, Recent advances on the use of meta - heuristic optimization algorithms to optimize the type - 2 fuzzy logic s systems in intelligent control, Neural Computing and Applications , pp 1 - 21 , 2015 .
- [69] A. Baziar, A. Kavooosi-Fard and J. Zare . “A Novel Self Adaptive Modification Approach Based on Bat Algorithm for Optimal Management of Renewable MG”. Journal of Intelligent Learning Systems and Applications, 2013, pp. 11-18.
- [70] V. Gaudes, Conception d'heuristiques d'optimisation pour les problèmes de grande dimension. Application à l'analyse de données de puces à ADN, Thèse de Doctorat , Université de Paris - Est Créteil, 2011.
- [71] S.hamma, Etude de méthodes numériques d'optimisation globale, thèse de doctorat, l'université Paul Sabatier du Toulouse.
- [72] M. Minoux, Programmation mathématique théorie et algorithmes, Tome1, Paris, 1983.
- [73] A. Chamekh, Optimisation des procédés de mise en forme par les réseaux de Neurones Artificiels , Thèse de doctorat, École nationale d'ingénieurs de Monastir, Tunisie, 2007.

- [74] L. Wehenkel, appendices communs aux cours (Introduction aux processus stochastiques), université de Liège, 1999.
- [75] B. Puig, Modélisation et simulation de processus stochastiques non gaussiens, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2003.
- [76] A. Nakib, Conception de métaheuristiques d'optimisation pour la segmentation d'images. Application à des images biomédicales, Thèse de doctorat, Université Paris 12 - Val de Marne Université de sciences et technologie, Paris, 2007.
- [77] J. Holland, Adaptation in natural and artificial systems. University of Michigan Press. 1975.
- [78] B. Bhanu, Genetic Learning for adaptive image segmentation. USA : Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [79] Dommel H W, Tinney W F. Optimal Power Flow Solutions. IEEE Trans. vol. PAS-87; 10 October 1968. p. 1866-1876.
- [80] J. Kennedy, R. C. Eberhart, Y. Shi. Swarm intelligence. Ed. Morgan Kaufmann; 2001.
- [81] V. Maniezzo, M. Dorigo and A. Coloni, The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B, Vol. 26(1), pp.29 – 41, 1996.
- [82] R. Missoum, Etude d'un dispatching économique des puissances actives par les algorithmes de fourmis, Thèse de magister, Université Hassiba Ben Bouali, Chlef, 2008.