

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Présenté par :

Belkhir Oualid

**Thème:**

Optimisation d'un réseau de transport en présence de stockage  
d'énergie et des éoliennes par la méthode des  
contraintes quadratiques (QCP)

Devant les membres de composé de :

M <sup>f</sup> Boukaroura Abdelkader	MAB	Président	UKM Ouargla
M <sup>f</sup> Bouhadouza Boubekour	MAA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M <sup>f</sup> Sadaoui Fares	MCA	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2022/2021

# إهداء

الحمد لله وكفى والصلاة على الحبيب المصطفى وأهله ومن وفى أما بعد :  
الحمد لله الذي وفقنا لنتمين هذه الخطوة في مسيرتنا الدراسية بمذكرتنا هذه  
ثمرة الجهد والنجاح بفضلته تعالى مهداة إلى الوالدين الكريمين حفظهما الله  
وأدامهما نورا لدربي.

لكل العائلة الكريمة التي ساندتني ولا تزال من أخوة وأخوات إلى رفقاء  
المشوار الدين قاسموني لحظاته رعاهم الله ووفقهم.

إلى كل قسم الهندسة الكهربائية وجميع دفعة 2022م.  
جامعة قاصدي مرباح ورقلة

إلى كل من كان لهم اثر على حياتي

و إلى كل من أحبهم قلبي  
ونسيتهم قلبي.

وليد بالخير

## *Remerciements*

Nous voudrions particulièrement remercier Dieu Tout-Puissant qui nous a donné la santé et la force pour faire cet humble travail.

Ce travail n'aurait pas été riche et n'aurait pas été possible sans l'aide et l'encadrement de (B.BOUBEKEUR), nous vous remercions pour la qualité exceptionnelle de votre encadrement, votre patience à mon égard, votre rigueur et votre disponibilité tout au long de cette année.

Merci aux membres du jury, chacun nommément, qui nous ont fait l'honneur d'accepter ce travail.

Enfin, je tiens à remercier ma famille, mes proches et mes amis qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

## Résumé

L'un des problèmes confrontés entre la production et la consommation d'énergie électrique est le risque d'avoir un déséquilibre de fréquence, qui entraîne des pertes et coûts élevés. L'intégration des sources éoliennes augmente le taux de production électrique mais son insertion demande une technologie de pointe pour assurer son fonctionnement adéquat. L'un des éléments clés insérés au système afin d'assurer l'équilibre production-consommation et d'emmagasiner l'énergie intermittente des éoliennes est les systèmes de stockage d'énergie électrique. Cette étude est consacrée à minimiser la fonction du coût en utilisant une méthode d'optimisation conventionnelle QCP en présence de sources éoliennes et de système de stockage d'énergie ESS. Les résultats montrent clairement l'avantage de ce dernier pour minimiser la fonction du coût et assurer l'équilibre du système de puissance.

**Mots clés:** optimisation quadratique, système de stockage, sources éolienne, centrale thermique.

## ملخص

من المشاكل التي تواجه بين إنتاج واستهلاك الطاقة الكهربائية خطر وجود اختلال في التردد ، مما يؤدي إلى خسائر وتكاليف عالية. يزيد تكامل مصادر الرياح من معدل إنتاج الكهرباء ولكن إدخالها يتطلب تقنية متقدمة لضمان عملها بشكل صحيح. تعتبر أنظمة تخزين الطاقة الكهربائية أحد العناصر الرئيسية التي تم إدخالها في النظام والتي يمكن أن تساعد في تحقيق التوازن بين الإنتاج والاستهلاك وتخزين الطاقة المتقطعة لتوربينات الرياح. هذه الدراسة مخصصة لتقليل دالة التكلفة باستخدام طريقة تحسين QCP التقليدية في وجود مصادر الرياح ونظام تخزين الطاقة ESS. تظهر النتائج بوضوح ميزة الأخير لتقليل وظيفة التكلفة وضمان توازن نظام الطاقة.

**الكلمات المفتاحية:** التحسين التريبيعي ، نظام التخزين ، مصادر الرياح ، محطة الطاقة الحرارية.

## Abstract

One of the problems faced between the production and load of electrical energy is the risk of having a frequency imbalance, which leads to high losses and costs. The integration of wind sources increases the rate of electricity production but its insertion requires advanced technology to ensure its proper functioning. One of the key elements insert in the system that can help the production-consumption balance and store the intermittent energy of the wind turbines are the electrical energy storage systems. This study is devoted to minimizing the cost function using a conventional QCP optimization method in the presence of wind sources and the energy storage system ESS. The results clearly show the advantage of the latter to minimize the cost function and ensure the power system balance.

**Keywords:** quadratic optimization, storage system, wind sources, thermal power plant.

## Liste des abréviations et symboles

GAMS	General Algebraic Modeling System.
QCP	Quadratic Constrained Programming.
OPF	Optimal Power Flow
LP	Linear Programming
NLP	Nonlinear Programming.
MIP	Mixed Integer Programming.
SOC	State Of Charge.
OF	Total operating costs (\$/h).
TC	Total operating costs (\$).
EM	Total émissions (kg).
VOLL	Value of loss of load (\$/MW h).
VWC	Value of wind curtailment
$RD_g/RU_g$	Ramp-up/down limit of generation unit $i$ (MW/h).
$\Lambda_t^w$	Disponibilité du vent à l'heure $t$
$L_t$	Demande électrique à l'heure $t$ .
$\delta_i$	Angle de tension dans le bus $i$ (rad).
$a_i, b_i, c_i, d_i, et e_i$	Les coefficients de la fonction d'émission pour chaque générateur $i$ .
$P_g$	Puissance active générée.
$\eta_g$	Nombre de générateur.
$L_i$	Limite maximale de variable $i$ .
$F_1, F_2, F_3$	Fonction objectifs.
$A_i, B_i, C_i$	Coefficients de la fonction coût.
ESS	Systèmes de stockage d'énergie.
BESS	Batterie Systèmes de stockage d'énergie.
CAES	Stockage d'énergie à air comprimé.
SMES	Stockage d'énergie magnétique supraconducteur.
TEES	Stockage d'énergie thermoélectrique.



# Sommaire

## Sommaire

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction Générale.....	1

### Chapitre 01: Généralités sur le système étudié

1.1 Introduction.....	4
1.2 Définition du système électrique.....	4
1.3 Les réseaux électriques.....	5
1.4 Définition le Réseau de transport.....	5
1.5 Technologies de production de base.....	5
1.6 Technologie de production renouvelables.....	5
1.6.1 Production éolienne.....	5
1.6.1.1 Générateur asynchrone a vitesse fixe.....	6
1.6.1.2 Générateur asynchrone double alimentation.....	7
1.6.2 Production solaire (Photovoltaïques).....	7
1.7 Ecoulement Optimal des puissance (OPF).....	8
1.7.1 Méthode a contraintes quadratique.....	8
1.7.2 Domaines d'application de l'écoulement de puissance optimal.....	8
1.7.2.1 Minimisation du coût de combustible.....	8
1.7.2.2 Minimisation d'émission des gaz .....	9
1.7.2.3 Minimisation des pertes de puissance.....	9
1.7.2.4 Minimisation de l'indice de la stabilité de la tension.....	9
1.7.2.5 Maximisation de la puissance transmissible.....	10
1.8 Système de stockage d'énergie (ESS).....	10
1.8.1 Technologies de stockage d'énergie.....	10
1.8.1.1 La batterie (BESS).....	10
1.8.1.2 Stockage d'énergie à air comprimé (CAES).....	10
1.8.1.3 Stockage d'énergie magnétique supraconducteur (SMES).....	11
1.8.1.4 Stockage d'énergie thermoélectrique (TESS).....	11
1.9 Allocation de production renouvelable dans les réseaux électriques.....	12
1.10 Définition des méthodes d'optimisation conventionnelles.....	12
1.10.1 Programmation linéaire (PL).....	13
1.10.2 Programmation en nombres entiers mixtes (MIP).....	13
1.10.3 Programmation non linéaire (PNL).....	13
1.10.4 Programmation constraint quadratique (QCP).....	13
1.11 Définition des Méthodes Méta heuristiques.....	14
1.12 Conclusion.....	15

## Chapitre 02 : Modélisation et optimisation de système étudié

2.1 Introduction.....	17
2.2 Modélisation et optimisation d'un système électrique.....	17
2.2.1 répartition de la centrales électrique.....	17
2.2.1.1 Envoi économique de l'unité thermique.....	17
2.2.1.2 Dispatching économique dynamique.....	19
2.2.2 Economique dispache du réseau étudié compte tenu de la production éolienne.....	23
2.2.3 Optimisation de réseau étudié en présence des éoliennes et de système de stockage d'Energie.....	25
2.2.4 Economique dispache avec ESS _ éolienne.....	29
2.3 Conclusion.....	32
2.4 Conclusion general.....	34

## Liste des figures

### Chapitre 01 Généralités sur le système étudié

Figure 1.1 : Réseau électrique simplifié .....	4
Figure 1.2 : Centrale thermique le produire de l'énergie électrique.....	5
Figure 1.3 : Composition d'une éolienne.....	6
Figure 1.4 : éolienne à vitesse fixe.....	6
Figure 1.5 : éolienne à vitesse variable.....	7
Figure 1.6 : model et cellule PV.....	7
Figure 1.7 : Stockage d'énergie à air comprimé (CAES).....	10
Figure 1.8 : Schéma de principe d'un système de stockage d'énergie magnétique supraconducteur.....	11
Figure 1.9 : Stockage d'énergie thermoélectrique (TESS).....	11
Figure 1.10 : Système de distribution avec génération distribuée.....	12
Figure 1.11 : classification des méta- heuristiques.....	15

### Chapitre 02 Modélisation et optimisation de système étudié

Figure 2.1 : puissances générées optimales.....	19
Figure 2.2 : courbe de charge.....	21
Figure 2.3 : évolution optimale de la puissance générée par les unités thermiques .....	21
Figure 2.4 : évolution de la demande et puissance éolienne.....	23
Figure 2.5 : évolution de la puissance générée.....	24
Figure 2.6 : évolution des puissances fournir et consommée et l'état de stockage.....	27
Figure 2.7 : pics de chargement et déchargement du ESS.....	27
Figure 2.8 : évolution de la puissance générée.....	29
Figure 2.9 : puissance optimale générée en présence de ESS, charge, et éolienne.....	30
Figure 2.10 : charge et décharge de ESS.....	31
Figure 2.11 : évolution optimale de la puissance générée.....	33

## Liste des tableaux

### Chapitre 02 Modélisation et optimisation de système étudié

Tableau 2.1 : coefficients économiques des générateurs.....	18
Tableau 2.2 : répartition optimale des unités de production.....	18
Tableau 2.3 : données de répartition économique dynamique pour quatre unités.....	21
Tableau 2.4 : répartition optimal des unités de production .....	22
Tableau 2.5 : puissances optimales avec les sources éoliennes.....	24
Tableau 2.6 : paramètres du ESS.....	25
Tableau 2.7 : l'état de chargement et déchargement de ESS sans éolienne.....	26
Tableau 2.8 : puissance générée par les centrales du système étudié.....	28
Tableau 2.9 : puissances optimales avec ESS_ éolien .....	30
Tableau 2.10 : puissance optimal générée avec éolienne-ESS.....	32
Tableau 2.11 : Une étude comparative .....	33

# Introduction générale

### Introduction Général

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, ...etc.). La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et par conséquent à une augmentation de la pollution. En effet, une des possibilités consiste à accroître le taux de production de l'énergie électrique à partir des ressources de type non-fossiles et renouvelables. Les exploitations en cours et des études de recherche, ont montré que ce type d'énergies renouvelables possède des atouts majeurs pour augmenter le taux de participation de ces énergies propres à la production d'électricité, toute en limitant l'impact négatif sur l'environnement. Aujourd'hui, les sources d'énergies renouvelables, notamment le solaire et l'éolien, sont les énergies dont le taux de croissance est le plus élevé.

Quand les méthodes conventionnelles de fourniture d'énergie électrique comme l'extension du réseau et l'utilisation de générateurs diesel deviennent trop coûteuses ou difficiles à implémenter, les technologies renouvelables, capables de générer de l'électricité sur place, sont une possibilité très intéressante, tant au niveau technique qu'économique [1].

Tant que l'énergie électrique ne se stocke que dans des volumes limités. Les technologies de système de stockage d'énergie (ESS) fournissent une méthode de contrôle efficace pour le fonctionnement des systèmes électriques à forte pénétration d'énergie éolienne. En tant que principal mode d'utilisation des énergies renouvelables, le système éolien-ESS peut lisser la fluctuation de la production, améliorer l'adaptation de la puissance et améliorer la stabilité du système électrique [2], [3]. Plus la capacité de l'ESS est grande, plus le système combiné est flexible. Mais des ESS superflus peuvent être déployés, ce qui augmente considérablement les coûts d'investissement et de maintenance initiaux [4]. Par conséquent, le dimensionnement optimal de l'ESS dans les systèmes éoliens est d'une importance vitale pour l'application à grande échelle de l'énergie éolienne à l'avenir.

L'écoulement de puissance optimal (OPF) est pour mission de minimiser le coût de production total et/ou de diminuer les pertes de puissance, et prendre en considération de nombreuses contraintes parmi lesquelles les limites de production des centrales, les capacités de transport des lignes électriques, les limites des transformateurs et d'autres limites [5] [6].

L'exploitation des réseaux électriques possède nombreux problèmes d'ordre technique et économique. L'exploitant du réseau doit assurer en tout temps réel et en tout lieu la couverture de

## Introduction Général

l'énergie demandée, de garantir une qualité acceptable de la puissance livrée et de procurer une sécurité d'alimentation élevée avec un coût aussi faible que possible. L'apparition de la crise d'énergie et les prix de plus en plus chers des combustibles ont donné au fonctionnement optimal ou économique des systèmes d'énergie électrique une position importante dans l'industrie de l'électricité [7].

Le problème d'OPF peut être résolu par deux types des méthodes d'optimisation : conventionnelles ou nouvelles modernes. Les méthodes d'optimisation conventionnelles sont utilisées pour résoudre le problème de l'OPF, les plus courantes, sont la méthode de Gradient, la méthode de Newton, la Programmation linéaire, la Programmation quadratique et la méthode des points intérieurs. Et celles modernes utilisent le recuit simulé, les colonies de fourmis, essais particuliers...etc.

L'objectif de cette thèse est de développer et d'améliorer l'efficacité du réseau de transport d'électricité en utilisant la méthode d'optimisation traditionnelle "QCP" en présence de sources d'énergie renouvelables (énergie éolienne) et de système de stockage d'énergie.

# **Chapitre 01**

## **Généralités sur le système étudié**

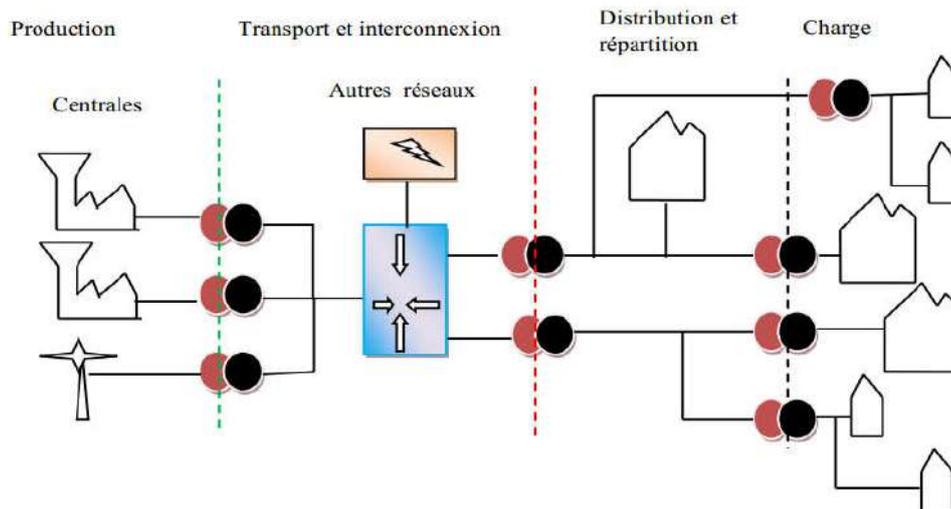
### 1.1 Introduction

Aujourd'hui et dans le monde entier, l'électricité est un besoin fondamental au développement social et économique. Son importance relative s'accroît avec les progrès techniques, l'industrialisation et le besoin de confort moderne. Cependant, les énergies fossiles assurent actuellement la majorité de cette production, mais face à l'épuisement de ces ressources énergétiques, aux problèmes de l'environnement et à l'augmentation considérable des besoins en énergie, la recherche de nouvelles ressources énergétiques est l'une des priorités de la politique énergétique de plusieurs pays.

L'optimisation vis-à-vis un système de puissance intéresse à minimiser leurs fonctions de cout de production, à diminuer les gaz a effet de serre, a diminuer les pertes active dans les lignes de transport....etc. Dans ce premier chapitre, nous avons donné quelques notions sur les systèmes renouvelables, le système de stockage, et ainsi que les différentes méthodes d'optimisation de système électrique.

### 1.2 Définition du système électrique

Le « système électrique » est l'ensemble des équipements électriques qui assurent la livraison à tous les consommateurs des kilowattheures produits. Le système électrique peut être séparé en quatre fonctions principales dans la Figure.1.1:



**Figure 1.1** : Réseau électrique simplifié

### 1.3 Les réseaux électriques

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué des

lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Et il est composé de réseau de transport, de répartition et de distribution.

#### 1.4 Définition du Réseau de transport

Les réseaux de transport sont des réseaux à très haute tension pour raison économique notamment, afin de minimiser les pertes en ligne. Ces réseaux de transport sont des réseaux maillés pour les raison de sécurité. Les réseaux de transport sont caractérisés par des transferts de puissance important avec à moins chute de tension et moins pertes.

#### 1.5 Technologies de production de base

La centrale thermique est un type de centrale électrique qui fonctionne pour produire de l'électricité et de l'énergie thermique ensemble. L'électricité est produite à partir de la chaleur émise par la combustion du charbon, du mazout ou du gaz naturel, voire de rayonnement nucléaire. Ces types de production électrique produisent des puissance d'ordres élevée.

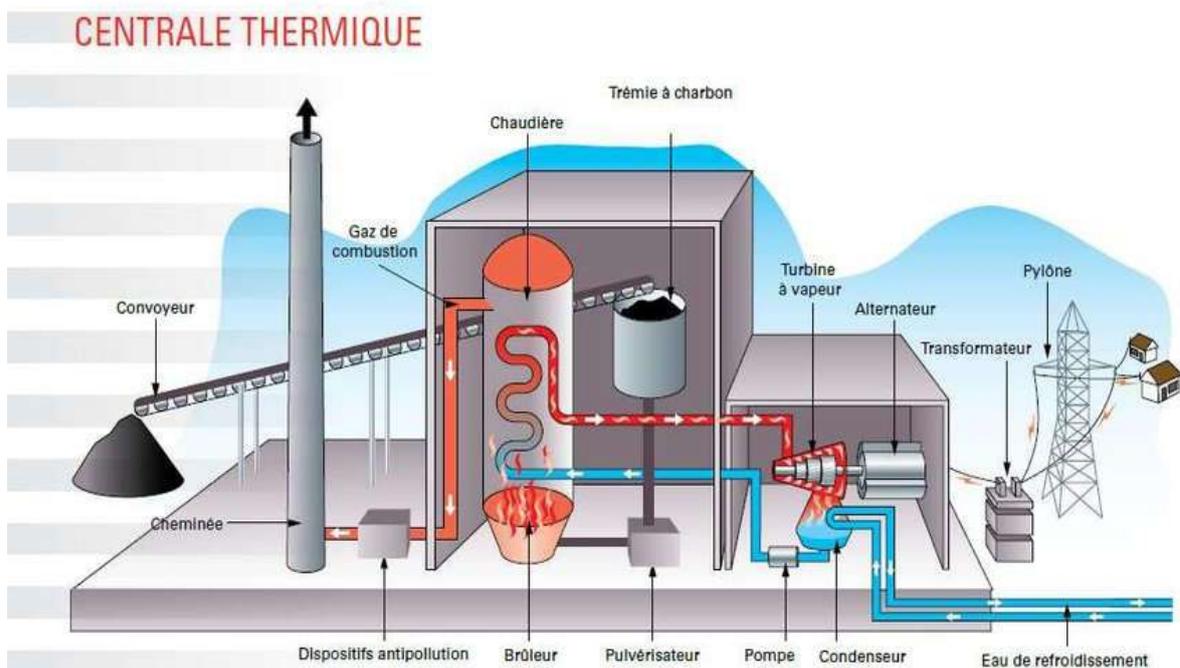


Figure 1.2 : Centrale thermique

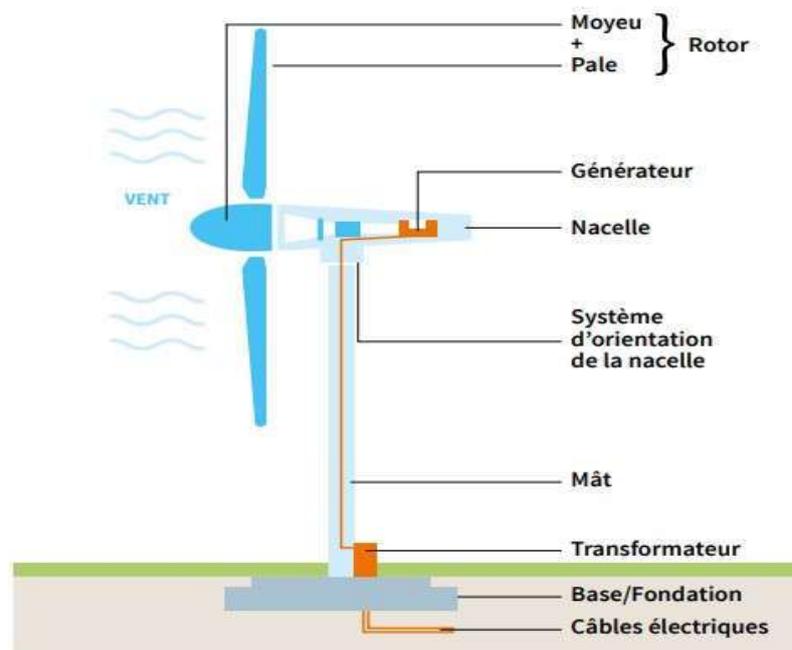
#### 1.6 Technologie de production renouvelables

Parmi les sources renouvelables permettant de produire l'énergie électrique, on cite la source à base de vent (éolienne) et source à base de rayonnement solaire (Photovoltaïque)

### 1.6.1 Production éolienne

Une éolienne est un dispositif qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Il est considéré comme un type d'énergie électromécanique. L'énergie éolienne est l'un des types d'énergie renouvelable qui a été largement utilisée comme alternative aux combustibles fossiles, et c'est une énergie abondante et renouvelable. Ces éoliennes sont à base d'une vitesse fixe et à vitesse variable.

La figure 1.3 présente les différentes parties d'une éolienne.



**Figure 1.3** Composition d'une éolienne

#### 1.6.1.1 Générateur asynchrone à vitesse fixe

La génératrice asynchrone à cage est actuellement la machine électrique dont l'usage est le plus répandu dans la production d'énergie éolienne à vitesse fixe. Son principal intérêt réside dans l'absence de contacts électriques par balais-collecteurs, ce qui conduit à une structure simple, robuste et facile à construire.

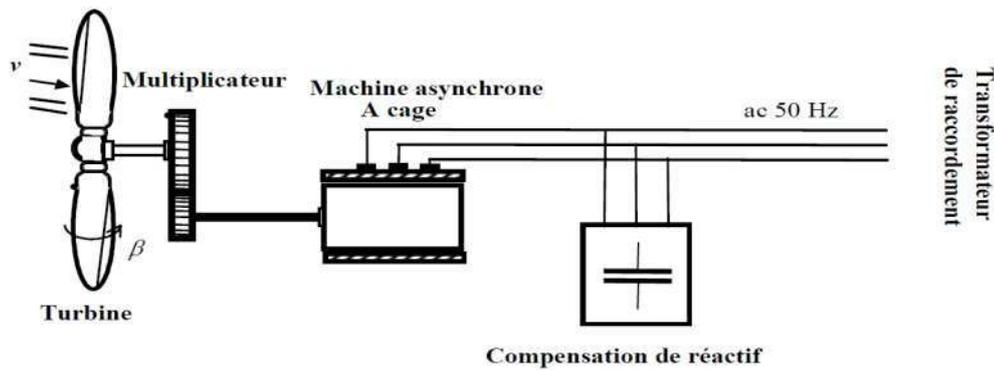


Figure 1.4: éolienne à vitesse fixe

### 1.6.1.2 Générateur asynchrone à double alimentation

Un générateur à induction à double alimentation, comme son nom l'indique, est un générateur à induction triphasé où les enroulements du rotor et du stator sont alimentés avec un signal alternatif triphasé. Il se compose d'enroulements multi phases placés à la fois sur le corps du rotor et du stator.

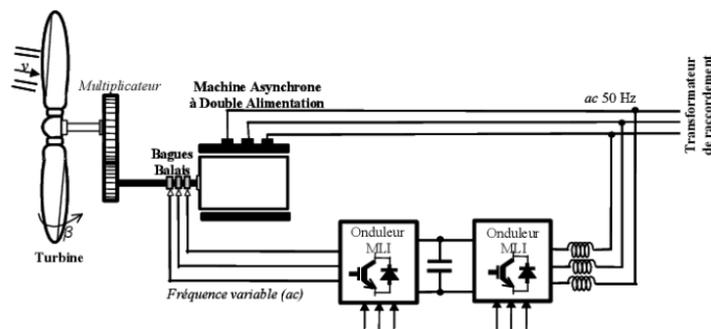


Figure 1.5: Eolienne à vitesse variable

### 1.6.2 Production solaire (Photovoltaïque)

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement solaire. Les panneaux photovoltaïques, composés de cellules photovoltaïques à base de silicium, ont la capacité de transformer l'énergie photonique en énergie électrique. Le courant continu ainsi produit est directement utilisable. Les panneaux photovoltaïques sont des composants semi-conducteurs utilisant leur propriété de photoélectricité pour générer la puissance électrique selon un principe appelé « effet photoélectrique ». La fabrication des panneaux solaires est actuellement coûteuse bien que la matière première (silice) soit abondante et peu onéreuse. Cela s'explique par une énergie significative nécessaire à la production des cellules. De réels progrès ont toutefois été réalisés. Un autre inconvénient est celui de la pollution à la production qui est due à la technologie employée. [8].

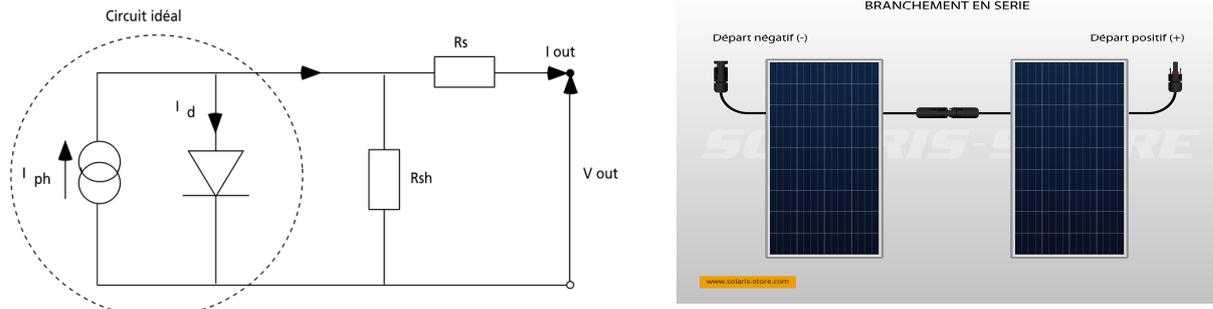


Figure 1.6 : Model et cellule PV

## 1.7 Ecoulement Optimal de puissance (OPF)

L'écoulement Optimal de puissance (OPF) constitue un outil très largement utilisé pour optimiser le contrôle en régime permanent et les performances d'un réseau électrique AC traditionnel. Plusieurs méthodes sont élaborées pour résoudre le problème de l'écoulement optimal des puissances [9] et qu'on peut les classer en deux classes :

- ✓ **programmation linéaire** : Le principe de cette méthode consiste à approximer la fonction objective vers une fonction linéaire où les contraintes sont linéaires autour d'un point de fonctionnement donné [10].
- ✓ **programmation non linéaire** : L'objectif pour ces méthodes est de chercher un minimum (ou maximum) d'une fonction  $f$  de  $n$  variables  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Chacune de ces variables peuvent prendre n'importe quelle valeur. Parmi les méthodes les plus utilisées nous pouvons citer [11], [12] :
  - Méthode des multiplicateurs de Lagrange.
  - Méthode du gradient.
  - Méthode de Newton.

### 1.7.1 Méthode à contraintes quadratique

#### 1.7.1.1 Minimisation du coût du combustible

Le point de départ de l'OPF est la minimisation des coûts d'exploitation des réseaux électriques. La minimisation du coût du combustible est la principal objectif dans cette catégorie [13]. La fonction la plus simple qui représente le coût total du combustible est la suivante :

$$F_1 = \sum_{i=1}^{ng} A_i + B_i P_{g_i} + C_i P_{g_i}^2 \quad (1.1)$$

Où  $A_i, B_i, C_i$  sont les coefficients de la fonction de coût de chaque générateur  $i$ ,  $P_{g_i}$  est la puissance active générée par le générateurs  $i$ ,  $ng$  est le nombre des générateurs de production.

### 1.7.1.2 Minimisation d'émission des gaz

Les unités de production thermique peuvent libérer des quantités importantes des polluants gazeux dans l'atmosphère, comme, le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), l'oxyde de nitrogène ( $NO_x$ ) et le dioxyde de soufre ( $SO_x$ ). A cause des effets néfastes de ces gaz toxiques, on peut prendre en considération le problème d'émission des gaz dans l'écoulement de puissance optimal sous forme d'une fonction objectif à minimiser pour limiter le taux de ces émissions [14]. Mathématiquement, la fonction qui minimise l'émission des gaz  $F_2$  est donnée par :

$$F_2 = \sum_{g,t} d_g P_{g,t}^2 + e_g P_{g,t} + f_g \quad (1.2)$$

### 1.7.1.3 Minimisation des pertes de puissance

La fonction objectif à minimiser est la somme des pertes actives dans toutes les lignes de transport et les transformateurs de puissance d'un réseau électrique [15], elle est donnée par l'équation suivante :

$$F_3 = \sum_{i=1}^{nb} (G_k (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \delta_{ij})) \quad (1.3)$$

Où,  $nb$  est le nombre de branches du réseau électrique,  $G_k$  est la conductance de la branche  $k$  qui se trouve entre les deux jeux de barres  $i$  et  $j$ .

### 1.7.1.4 Minimisation de l'indice de la stabilité de la tension

La stabilité de la tension est définie comme la capacité d'un réseau électrique à maintenir des tensions acceptables en chaque point dans le réseau suite à une perturbation [16].

$$F_4 = F_{L_{index}}(x) = \min(VSI) = \text{Min}(\max(L_j)) \quad (1.4)$$

$$\text{Avec : } L_j = \left| 1 - \sum_{i=1}^{NW} (-[Y_1]^{-1} * [Y_2]) * \frac{V_i}{V_j} \angle(\theta_{ij} + (\delta_j)) \right|, \\ j = 1, 2, \dots, N_{PQ} \quad (1.5)$$

Avec,  $Y_1, Y_2$  sont des sous-matrices de la matrice  $Y_{bus}$ ,  $L_j \in [0 - 1]$  et  $N_{PQ}$  représente le nombre de jeux de barres de charge.

### 1.7.1.5 Maximisation de la puissance transmissible

Maximiser le transfert de puissance est un objectif appréciable pour les systèmes interconnectés. Il peut aider à minimiser les coûts d'exploitation des systèmes électriques en plus d'autres avantages tel que l'amélioration de la fiabilité.

## 1.8 Système de stockage d'énergie (ESS)

Un système de stockage d'énergie, souvent désigné par l'abréviation (ESS), est un appareil ou groupe d'appareils regroupés, capables de stocker de l'énergie afin de fournir ultérieurement de l'énergie électrique.

### 1.8.1 Technologies de stockage d'énergie

#### 1.8.1.1 La batterie (BESS)

(BESS) est un système de stockage d'énergie (ESS) qui capte l'énergie de différentes sources, accumule au cette énergie et la stocke dans des batteries rechargeables pour une utilisation ultérieure. En cas de besoin, l'énergie électrochimique est déchargée de la batterie et fournie aux habitations, aux véhicules électriques et aux installations industrielles et commerciales.

#### 1.8.1.2 Stockage d'énergie à air comprimé (CAES)

(CAES) est une technologie qui stocke l'énergie sous forme d'air comprimé pour une utilisation ultérieure. L'énergie est extraite à l'aide d'une turbine à gaz standard, où l'étage de compression d'air de la turbine est remplacé par le CAES, éliminant ainsi l'utilisation de gaz naturel pour la compression d'air [17].

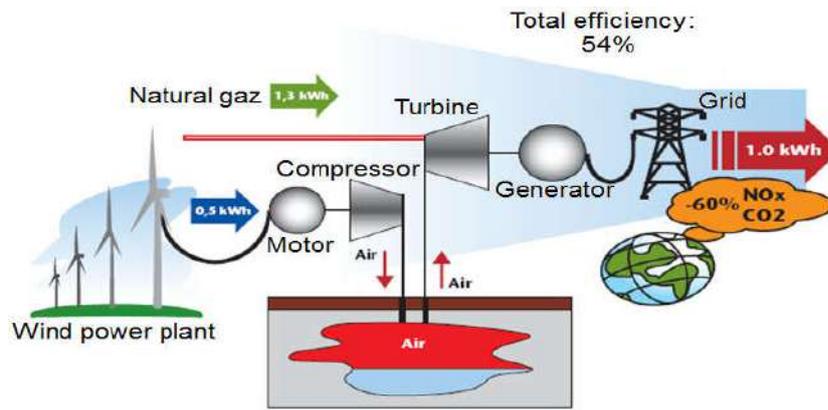


Figure 1.7: Stockage d'énergie à air comprimé (CAES)

### 1.8.1.3 Stockage d'énergie magnétique supraconducteur (SMES)

Le (SMES) consiste à stocker de l'énergie dans le champ magnétique créé par un courant continu traversant une bobine supraconductrice. La bobine est refroidie cryogéniquement à une température inférieure à sa température critique supraconductrice [18].

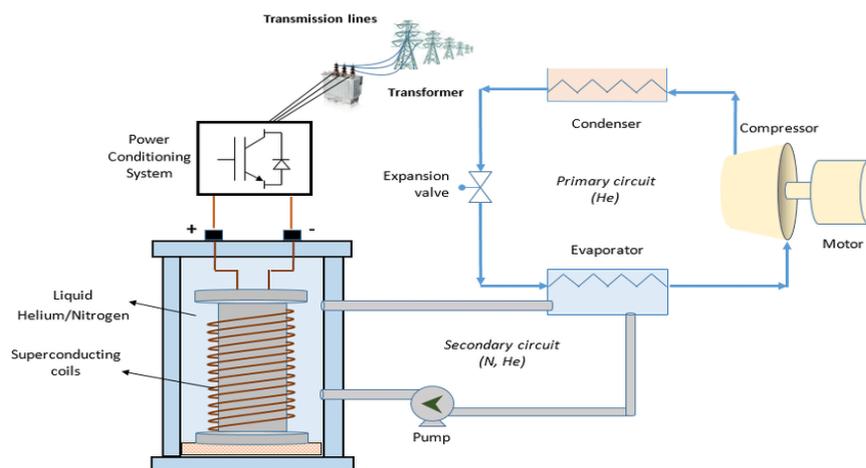


Figure 1.8 : Schéma de principe d'un système de stockage d'énergie magnétique supraconducteur

### 1.8.1.4 Stockage d'énergie thermoélectrique (TESS)

Le (TEES) pour centrales solaires thermiques se compose d'une huile synthétique ou d'un sel fondu qui stocke l'énergie sous forme de chaleur collectée par les centrales solaires thermiques pour permettre une production d'électricité régulière pendant les périodes nuageuses pendant la journée et pour prolonger la production d'électricité pendant 1 à 10 heures après le coucher du soleil [19].

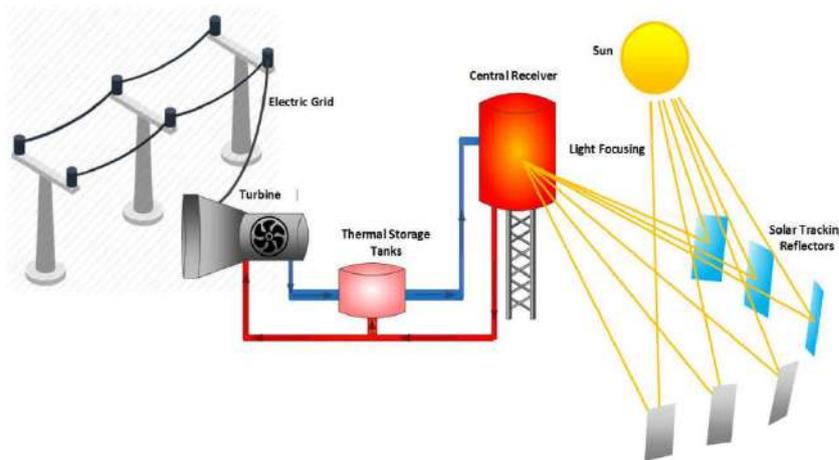


Figure 1.9 : Stockage d'énergie thermoélectrique (TESS)

### 1.9 Allocation de production renouvelable dans les réseaux électriques.

La production d'énergie électrique par les sources éolienne ou solaire peuvent alléger l'écoulement de courant dans les lignes de transport (minimisation des pertes lignes) si ces centrale renouvelables citées sont proche des charges de taille importante, ainsi on peut stocker l'énergie produite par ces dernières une fois la demande est faible

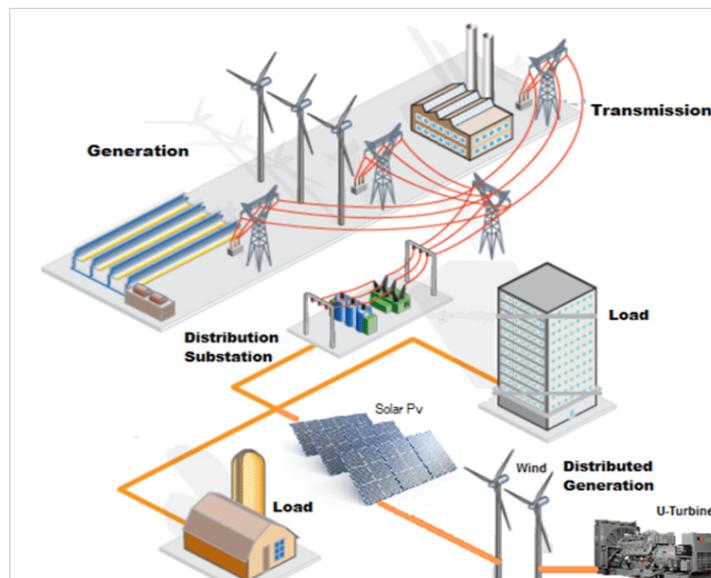


Figure 1.10 : Système de distribution avec génération distribuée

### 1.10 Définition des méthodes d'optimisation conventionnelles

Parmi ces méthodes et programmes : la programmation linéaire (LP), la programmation mixte en nombres entiers (MIP), la programmation non linéaire (NLP), la programmation quadratique

(QCP), la programmation mixte non linéaire (MINLP), les problèmes d'optimisation multi-objectifs [20].

- La forme générale d'un problème d'optimisation est la suivante :

$$\min_x f(X, I) \quad (1.6a)$$

$$G(X, I) \leq 0 \quad (1.6b)$$

$$H(X, I) = 0 \quad (1.6c)$$

Définition d'un problème d'optimisation:

G: contraintes d'inégalité.

H: contraintes d'égalité.

### 1.10.1 Programmation linéaire (PL)

La programmation linéaire (LP, également appelée optimisation linéaire) est une méthode permettant d'obtenir le meilleur résultat (comme le profit maximum ou le coût le plus bas) dans un modèle mathématique dont les exigences sont représentées par des relations linéaires.

### 1.10.2 Programmation en nombres entiers mixtes (MIP)

Un problème de programmation en nombres entiers mixtes (MIP) est un problème où certaines des variables de décision sont contraintes d'être des valeurs entières (c'est-à-dire des nombres entiers tels que (-1, 0, 1, 2, etc.) à la solution optimale.

### 1.10.3 Programmation non linéaire (PNL)

En mathématiques, la programmation non linéaire (PNL) est le processus de résolution d'un problème d'optimisation où certaines des contraintes ou la fonction objectif sont non linéaires.

### 1.10.4 Programmation contrainte quadratique (QCP)

En optimisation mathématique, un programme a contrainte quadratique (QCP) est un problème d'optimisation dans lequel la fonction objectif et les contraintes sont des fonctions quadratiques. Il a la forme de minimiser ou de maximiser la fonction objective:

$$f(x) = cx + x'Qx \quad (1.7)$$

Pour

$$A_i x + x' R_i x \leq b_i \quad (1.8)$$

$$L \leq x \leq U \quad (1.9)$$

Où

$x$ : est un vecteur de variables qui sont des nombres réels continus ;

$\alpha$  : est la partie linéaire de la fonction objectif

$x' Q x$ : est la partie quadratique de la fonction objectif

$A_i x$ : représente la partie linéaire de la  $i^{\text{ème}}$  contrainte ;

$x' R_i x$ : représente la partie quadratique de la  $i^{\text{ème}}$  contrainte ;

$b_i$ : est le membre de droite de la  $i^{\text{ème}}$  contrainte ;

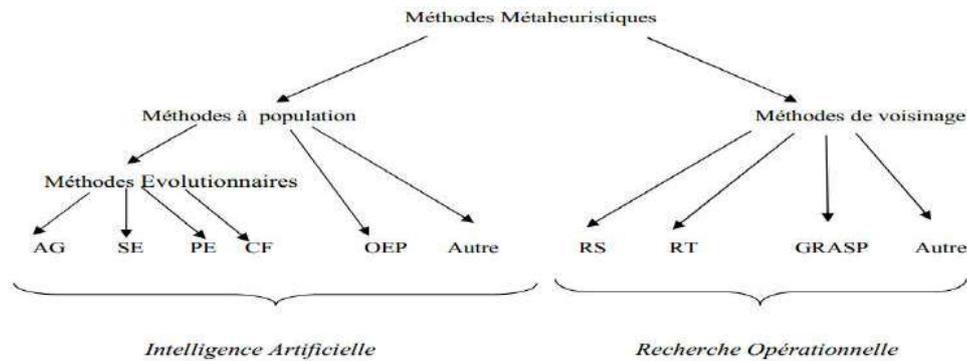
$\alpha$  : est la somme des opérateurs  $\leq$ ,  $=$  et  $\geq$  et  $L$  et  $U$  sont des vecteurs inférieures et supérieures des variables de contrôle [21].

La programmation quadratique est un cas particulier des problèmes de PNL. QCP est la classe la plus large de problèmes d'optimisation. En fait, Cette approche est utile car le QCP est NP-difficile et donc très difficile. Étant donné que (QCP) est une classe d'optimisation si vaste et si épineuse, il n'existe pas d'algorithmes spécialisés pour résoudre les QCP généraux comme il en existe pour LP, SOCP et SDP. Par conséquent, il est peu utile d'avoir un formulaire standard pour le QCP [22].

### 1.11 Définition des Méthodes Méta heuristiques

Les méta-heuristiques sont un ensemble d'algorithmes d'optimisation visant à résoudre les problèmes d'optimisation difficiles. Elles sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu'ils soient pris en physique (cas du recuit simulé), en biologie de l'évolution (cas des algorithmes Génétiques) ou encore en éthologie (cas des algorithmes de colonies de fourmis ou de l'optimisation par essaims particulaires). Ces techniques méta-heuristiques peuvent être classées en deux groupes :

- les méthodes à population de solutions connues sous le nom d'algorithmes évolutionnaires comme les algorithmes génétiques...etc., ainsi que les méthodes à solution unique comme le recuit simulé.
- Les méthodes méta heuristiques ont prouvé leurs efficacités dans le domaine de l'optimisation mono-objectif.



**Figure 1.11 :** Classification des méta- heuristiques

### 1.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçus sur les réseaux électriques, les sources de production de base, les sources renouvelables, notamment les éoliennes à vitesse fixe et variable et les sources solaires. Par la suite, nous avons donné aussi quelques notions sur les différents modes de stockage d'énergie électrique et enfin nous avons présenté quelques méthodes d'optimisation conventionnels.

# **Chapitre 02**

## **Modélisation et optimisation de système étudié**

## 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons modélisée à travers les équations correspondantes à l'optimisation des fonctions objectives considérées et ensuite analysé les résultats obtenus en utilisant le logiciel de programmation GAMS (General Algebraic Modeling System). Diverses technologies de centrales électriques seront abordées dans ce chapitre les résultats de l'optimisation du coût des générateurs synchrones en présence des sources intermittentes et de systèmes de stockage d'énergie électrique sont présentés.

## 2.2 Modélisation et optimisation d'un système électrique

### 2.2.1 Répartition des centrales électriques

Il fournit des conseils sur la façon de modéliser le problème de transmission économique pour différentes centrales électriques [20].

#### 2.2.1.1 Dispatching économique de l'unités thermique

La technologie de l'unité thermique transforme la source d'énergie à base de carburant en électricité.

Les coûts de production de l'unité thermique  $i$  sont calculés comme suit :

$$C_i^{th}(P_i^{th}) = a_i^{th}(P_i^{th})^2 + b_i^{th}P_i^{th} + c_i^{th} \quad (i \in \Omega_{th}) \quad (2.1)$$

Où  $a_i^{th}$ ,  $b_i^{th}$ , et  $c_i^{th}$  sont les coefficients de coût du combustible de l'unité thermique  $i$ .

Le coût total du carburant est calculé comme suit :

$$TC = \sum_{i \in \Omega_{th}} C_i^{th}(P_i^{th}) \quad (2.2)$$

Les limites de fonctionnement sont définies comme suit :

$$P_i^{th,min} \leq P_i^{th} \leq P_i^{th,max} \quad (i \in \Omega_{th}) \quad (2.3)$$

Où  $P_i^{th,max/min}$  sont les puissances maximales/minimales de l'unité thermique  $i$ .

Le dispatching économique global de l'unité thermique est formulé comme suit :

$$\min(TC) = \min \left( \sum_{i \in \Omega_{th}} C_i^{th}(P_i^{th}) \right) \quad (2.4a)$$

$$\sum_{i \in \Omega_{th}} P_i^{th} = L_e \quad (2.4b)$$

- Le tableau 2-1, représente les données des coefficients de coûts d'émission du gaz des générateurs thermiques, ainsi leurs limites minimale et maximale [20].

**Tableau 2-1 :** Coefficients économiques des générateurs

i	$a_i^{th} (\frac{\$}{MW^2})$	$b_i^{th} (\frac{\$}{MW})$	$c_i^{th} (\$)$	$d_i^{th} (\frac{kg}{MW^2})$	$e_i^{th} (\frac{kg}{MW})$	$f_i^{th} (kg)$	$P_i^{th.min} (MW)$	$P_i^{th.max} (MW)$
g1	3	20	100	2	-5	3	28	206
g2	4,05	18,07	98,87	3,82	-4,24	6,09	90	284
g3	4,05	15,55	104,26	5,01	-2,15	5,69	68	189
g4	3,99	19,21	107,21	1,1	-3,99	6,2	76	266
g5	3,88	26,18	95,31	3,55	-6,88	5,57	19	53

Ce tableau comporte neuf colonnes. La première colonne indique l'indice de l'unité de production. Les trois colonnes suivantes indiquent les coefficients de coût pour les unités thermiques ( $a_i^{th}, b_i^{th}, c_i^{th}$ ). Les trois colonnes suivantes décrivent les coefficients d'émission de ces unités thermiques ( $d_i^{th}, e_i^{th}, f_i^{th}$ ). Les deux dernières colonnes donnent les limites minimales et maximales de génération de chaque unité si elle est allumée.

Après l'implémentation du programme d'optimisation sur l'outil GAMS pour la fonction de coûts pour les générateurs cités auparavant en présence d'une charge totale de 400MW. Les résultats obtenus montre que les puissances générées pour chaque générateur sont dans leurs limites requises et que la fonction du coût est  $1,3146 \times 10^5$  \$.

Le tableau 2-2, représente les résultats de répartition optimale des puissances produites par les générateurs.

**Tableau 2-2, :** Répartition optimale des unités de production

$P_i^{th}$	g1	g2	g3	g4	g5
$P_{min}$	28	90	68	76	19
$P_{optimal}$	102,844	90	76,73	77,425	53
$P_{max}$	206	284	189	266	53
coût	1,3146 x 10 <sup>5</sup> \$				

Comme on peut le voir dans le tableau 2-2, quatre traits sont donnés pour la variante P (gen). Les valeurs « inférieures » et « supérieures » sont déjà connues et sont présentées comme données

d'entrée dans le tableau 2.1. Il existe deux éléments d'information importants concernant la variable P (gen), à savoir « niveau ». La colonne Niveau montre les valeurs optimales des variables obtenues par GAMS. La valeur limite est zéro (EPS ou epsilon) pour les unités g1, g3 et g4 et c'est parce que ces unités génératrices ne sont pas des variables contraignantes (elles n'ont pas atteint leurs limites). D'autre part, g2 a une valeur marginale. Cela signifie que si la valeur de cette variable augmente d'une très petite quantité ( $\Delta p(g2)$ ) Alors l'incrément dans la fonction objectif sera approximativement égal à la valeur marginale multiplier par  $\Delta p(g2)$ . Ce ci s'applique également à la source g5. L'augmentation de  $\Delta p(g5)$  diminuera la fonction objectif approximativement égale à  $199.605\Delta p(g5)$  C'est pourquoi g2 est à son minimum et g5 à son maximum.

La figure 2-1, montre l'évolution des puissances produites par les générateurs de système étudié en utilisant la méthode QCP.

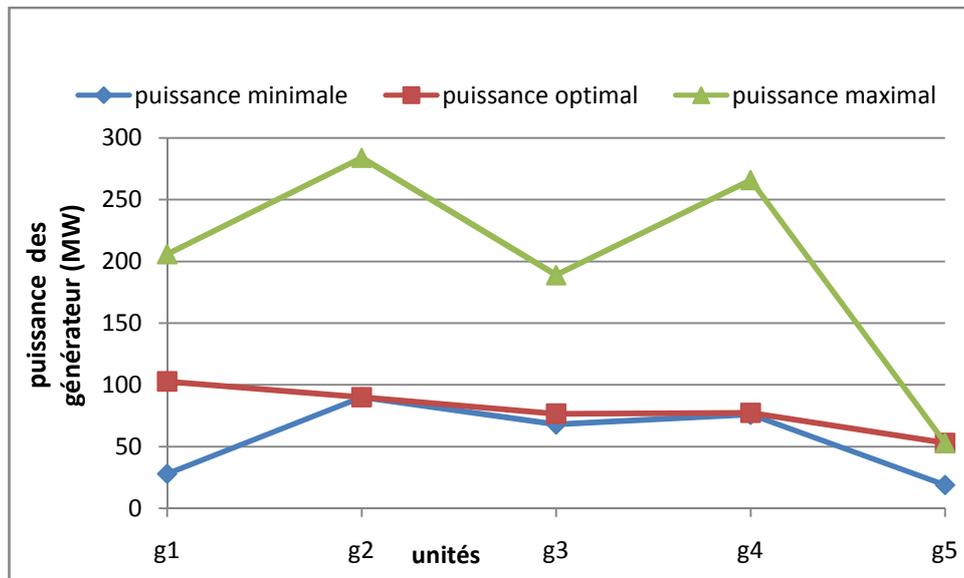


Figure 2.1: Puissances générées optimales

### 2.2.1.2 Dispatching économique dynamique

La fonction objective du ce type d'optimisation est de minimiser les coûts d'exploitation totaux tout en satisfaisant les demandes horaires et autres contraintes techniques.

La fonction de coût de production du  $i^{ième}$  générateur est définie comme suit:

$$C(P_{g,t}) = a_g P_{g,t}^2 + b_g P_{g,t} + c_g \tag{2.5}$$

Où

$a_g$ ,  $b_g$  et  $c_g$  sont les coefficients de coût du carburant de la  $i$ ème unité de production. Le coût total du carburant (TC) est calculé comme suit :

$$TC = \sum_{g,t} C(P_{g,t}) \quad (2.6)$$

L'émission totale des gaz (EM) est calculée comme suit :

$$EM = \sum_{g,t} d_g P_{g,t}^2 + e_g P_{g,t} + f_g \quad (2.7)$$

Les limites de fonctionnement sont définies comme suit :

$$P_g^{min} \leq P_{g,t} \leq P_g^{max} \quad (2.8)$$

Où

$P_g^{min/max}$  sont les sorties de puissance maximum/minimum de la  $i$ ème unité thermique.

Le dispatching économique dynamique global basé sur le coût de l'unité thermique est formulé comme suit:

$$\min_{P_{g,t}} TC = \sum_{g,t} a_g P_{g,t}^2 + b_g P_{g,t} + c_g \quad (2.9a)$$

$$EM = \sum_{g,t} d_g P_{g,t}^2 + e_g P_{g,t} + f_g \quad (2.9b)$$

$$P_g^{min} \leq P_{g,t} \leq P_g^{max} \quad (2.9c)$$

$$P_{g,t} - P_{g,t-1} \leq RU_g \quad (2.9d)$$

$$P_{g,t-1} - P_{g,t} \leq RD_g \quad (2.9e)$$

$$\sum_g P_{g,t} = L_t \quad (2.9f)$$

Sachant que  $RU_g/RD_g$  sont les ramps max et min de chaque générateur en (MW/h).

Le tableau 2-3 représente les coefficients de coût et d'émission du gaz de chaque unité de production ainsi leurs limites min et max de production.

Tableau 2-3, Coefficients de coût et d'émission de générateur.

Unités	$a_g (\frac{\$}{MW^2})$	$b_g (\frac{\$}{MW})$	$c_g (\$)$	$d_g (kg/MW^2)$	$e_g (\frac{Kg}{MW})$	$f_g (kg)$	$P_g^{min} (MW)$	$P_g^{max} (MW)$	$RU_g (MW)$	$RD_g (MW)$
g1	0,12	14,8	89	1,2	-5	3	28	200	40	40
g2	0,17	16,57	83	2,3	-4,24	6,09	20	290	30	30
g3	0,15	15,55	100	1,1	-2,15	5,69	30	190	30	30
g4	0,19	16,21	70	1,1	-3,99	6,2	20	260	50	50

Après l'implantation des données de ce système de puissance en présence d'une courbe de charge (figure2-2) .La répartition optimale de la puissance active produite par chaque générateur durant 24 heures est montrée dans la figure 2-3, et tableau 2-4

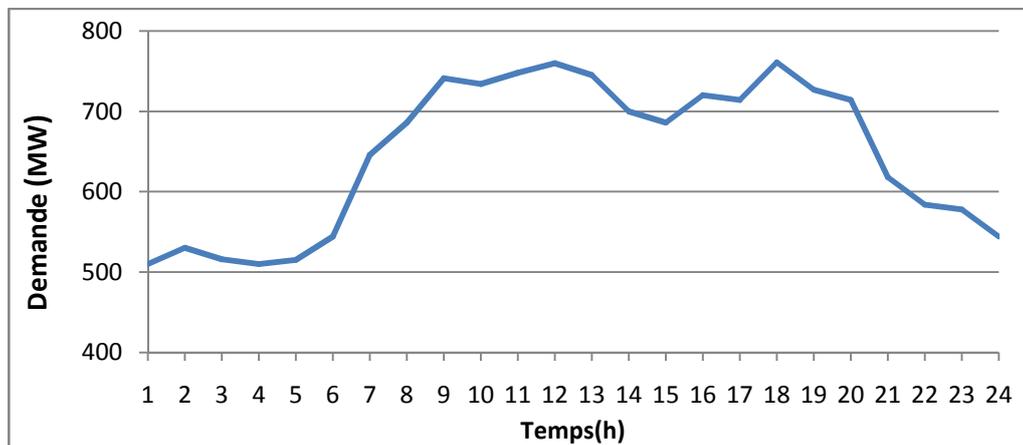


Figure 2-2: Courbe de charge

La solution numérique de dispatching économique donnée dans le tableau 2-4, avec un coût  $6,4769.10^5 \$$  et une émissions du gaz de  $3,5929.10^3$  tonnes.

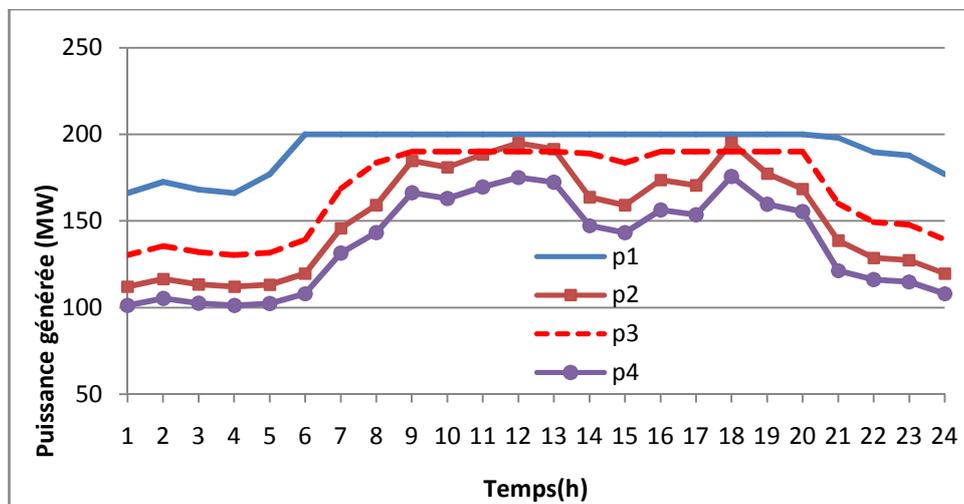


Figure2-3: Evolution optimale de la puissance générée par les unités thermiques

Nous constatons que partout où la demande d'énergie augmente ou diminue, il y a une augmentation ou une diminution de la consommation et de la production d'énergie.

**Tableau 2-4,** Répartition optimale des unités de production

Temps (h)	P <sub>1</sub> (MW)	P <sub>2</sub> (MW)	P <sub>3</sub> (MW)	P <sub>4</sub> (MW)	Charge (MW)
1	166.2	112.1	130.5	101.3	510
2	172.6	116.6	135.6	105.3	530
3	168.1	113.5	132	102.5	516
4	166.2	112.1	130.5	101.3	510
5	167.8	113.2	131.7	102.3	515
6	177	119.8	139.1	108.1	544
7	200	145.9	168.7	131.5	646
8	200	159.1	183.7	143.3	686
9	200	184.8	190	166.3	741
10	200	181.1	190	162.9	734
11	200	188.4	190	169.6	748
12	200	194.8	190	175.2	760
13	200	191.6	190	172.4	745
14	200	163.7	188.9	147.4	700
15	200	159.1	183.7	143.3	686
16	200	173.7	190	156.3	720
17	200	170.5	190	153.5	714
18	200	195.3	190	175.7	761
19	200	177.4	190	159.6	727
20	200	168.6	190	155.4	714
21	198	138.6	160	121.4	618
22	189.8	128.8	149.3	116.2	584
23	187.9	127.4	147.8	114.9	578
24	177	119.8	139.1	108.1	544

### 2.2.2 Dispatching économique du réseau étudié compte tenu de la production éolienne

Dans cette section, le rôle de la production d'énergie éolienne dans le problème de dispatching économique est analysé.

L'intégration des sources éoliennes et son évolution est formulée dont l'objectif est de minimiser la fonction coût des centrales thermiques et la fonction économique de l'éolienne avec ses contraintes comme représenté dans les équations ci dessous:

$$\min_{DV} TC = \sum_{g,t} a_g P_{g,t}^2 + b_g P_{g,t} + c_g + \sum_t VWC \times P_t^{wc} \quad (2.10a)$$

$$P_g^{min} \leq P_{g,t} \leq P_g^{max} \quad (2.10b)$$

$$P_{g,t} - P_{g,t-1} \leq RU_g \quad (2.10c)$$

$$P_{g,t-1} - P_{g,t} \leq RD_g \quad (2.10d)$$

$$P_t^w + \sum_g P_{g,t} = L_t \quad (2.10e)$$

Le dispatching économique fait référence à une classe de problèmes de dispatching économique dans lesquels il existe un réseau important. Dans chaque région, il existe différentes technologies de centrales électriques et différents modèles de la demande. La question est de savoir comment répartir différentes centrales électriques pour répondre à la demande tout en minimisant les coûts d'exploitation. L'évolution de la demande en énergie et celle de la puissance fournie par les sources éoliennes durant 24 heures est représentés dans la figure 2-4.

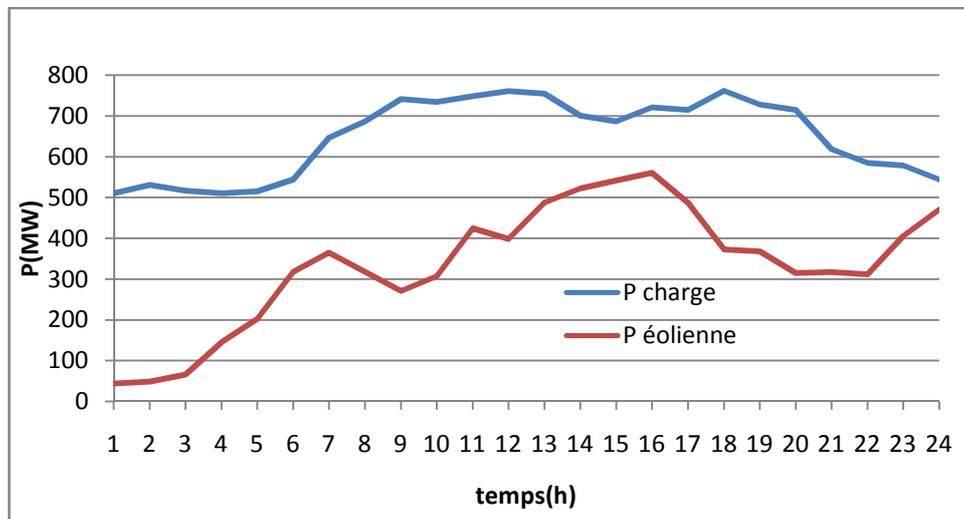


Figure 2-4, Evolution de la demande et puissance éolienne

Le tableau2-5 représente les puissances optimales générées par différentes centrales du système de puissance en présence des sources éoliennes pour une fonction du cout soit minimale durant 24 heures. Les couts totales avec l'intégration des éoliennes est  $2,2692.10^5\$$ .

Tableau 2-5, Puissances optimales avec les sources éoliennes

temps	$P_1$ (MW)	$P_2$ (MW)	$P_3$ (MW)	$P_4$ (MW)	$P^{ch}$ (MW)	$P^w$ (MW)
1	152,135	102,183	119,208	92,374	510	44,1
2	157,107	105,693	123,185	95,515	530	48,5
3	147,162	98,673	115,23	89,234	516	65,7
4	120,007	79,505	93,505	72,083	510	144,9
5	103,305	67,716	80,144	61,535	515	202,3
6	75,895	48,367	58,216	44,223	544	317,3
7	93,393	60,718	72,214	55,274	646	364,4
8	121,154	80,315	94,423	72,808	686	317,3
9	153,441	103,106	120,253	93,2	741	271
10	139,768	93,454	109,314	84,564	734	306,9
11	106,875	70,235	83	63,79	748	424,1
12	119,019	78,807	92,715	71,459	760	398
13	88,548	57,299	68,339	52,215	754	487,6
14	60,404	37,433	45,825	34,44	700	521,9
15	49,759	29,918	37,307	27,716	686	541,3
16	54,635	33,36	41,208	30,796	720	560
17	83,528	52,873	65,323	36,676	714	486,8
18	123,528	82,873	95,323	86,676	761	372,6
19	118,254	78,267	92,103	70,976	727	367,4
20	131,035	87,289	102,328	79,048	714	314,6
21	99,704	65,173	77,263	59,26	618	316,6
22	90,524	58,694	69,919	53,463	584	311,4
23	58,651	36,195	44,421	33,332	578	405,2
24	28	20	30	20	544	470,4

La figure suivante montre l'évolution de la puissance active générée par chaque centrale thermique en fonction de la charge correspondante et en présence des éoliennes afin de minimiser la fonction du cout.

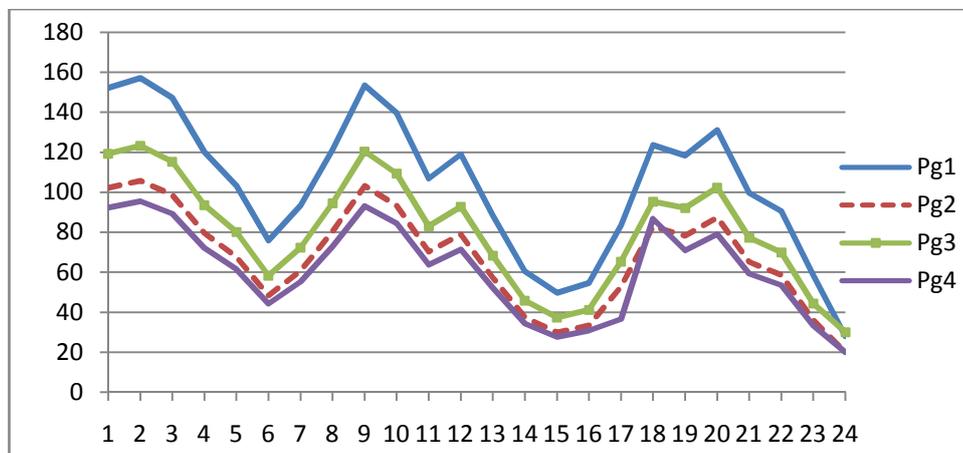


Figure 2-5: Evolution de la puissance générée

D'après la figure 2-5 et le tableau 2-5, on remarque que les puissances optimales fournies par les centrale thermique à t6, t15, et t24 sont faibles malgré la demande est importante puisque la puissance fournie par les éoliennes peuvent fournir le reste de puissance. Par contre, durant les périodes t2, t9, et t20 que les puissances optimales générées par ces centrales sont élevées avec une charge importantes en présence des sources éoliennes disponibles dans ces périodes.

**2.2.3 Optimisation de réseau étudié en présence de système de stockage d'énergie**

Le systèmes de stockage d'énergie est une alternative option pour augmenter la flexibilité du réseau électrique. Ces unités peuvent absorber l'énergie dans le cas où la demande est inférieure à la production et vise versa dans le cas ou la charge est supérieure à la production.

Les équations exploitées pour la minimisation de la fonction objective en présence des systèmes de stockage d'énergie électriques sont représentées par les équations suivantes:

$$\min_{P_{g,t}, SOC_t, P_t^d, P_t^c} TC = \sum_{g,t} a_g P_{g,t}^2 + b_g P_{g,t} + c_g \tag{2.13a}$$

$$P_g^{min} \leq P_{g,t} \leq P_g^{max} \tag{2.13b}$$

$$P_{g,t} - P_{g,t-1} \leq RU_g \tag{2.13c}$$

$$P_{g,t-1} - P_{g,t} \leq RD_g \tag{2.13d}$$

$$SOC_t = SOC_{t-1} + (P_t^c \eta_c - P_t^d / \eta_d) \Delta_t \tag{2.13e}$$

$$P_{min}^c \leq P_t^c \leq P_{max}^c \tag{2.13f}$$

$$P_{min}^d \leq P_t^d \leq P_{max}^d \tag{2.13g}$$

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \tag{2.13h}$$

$$\sum_g P_{g,t} + P_t^d = L_t - P_t^c \tag{2.13i}$$

Les paramètres de système de stockage d'énergie (ESS) sont mentionnés dans le tableau2-6:

**Tableau 2-6, Paramètres du ESS**

Paramètres	SOC <sub>min</sub>	SOC <sub>max</sub>	Pd <sub>max</sub>	Pd <sub>min</sub>	Pc <sub>max</sub>	Pc <sub>min</sub>	$\eta_c$	$\eta_d$
valeurs	100MW	300MW	0.2 SOC <sub>max</sub>	0	0.2 SOC <sub>max</sub>	0	95%	90%

Les paramètres des coefficient cout les mêmes que aux paravant dans le tableau 2-3

Après l'implémentation des données du système contenant quatre unités de production et les conditions d'égalités et d'inégalités représentées dans l'équation 2-13 dans un outil de programmation GAMS. Les résultats obtenus en utilisant la méthode d'optimisation QCP sont obtenus dans le tableau 2-7.

Tableau 2-7, l'état de chargement et déchargement de ESS sans éolienne

Temps	$L_t$ (MW)	$P_{g,t}$ (MW)	$SOC_t$ (MW)	$P_t^d$ (MW)	$P_t^c$ (MW)
1	510	555,922	143,625	0	45,921
2	530	555,922	168,25	0	25,921
3	516	555,922	206,175	0	39,921
4	510	555,922	249,8	0	45,921
5	515	555,922	288,675	0	40,921
6	544	555,922	300	0	11,921
7	646	646	300	0	0
8	686	686,001	300	0	0
9	741	716,275	272,528	24,725	0
10	734	716,275	252,834	17,725	0
11	748	716,275	217,584	31,725	0
12	760	716,275	169,001	43,725	0
13	754	716,275	127,085	37,725	0
14	700	695,377	127,085	0	0
15	686	686,001	127,085	0	0
16	720	716,275	122,946	3,725	0
17	714	714	122,946	0	0
18	761	716,275	73,252	44,725	0
19	727	716,275	61,335	10,725	0
20	714	712,798	60	1,202	0
21	618	618	60	0	0
22	584	583,999	60	0	0
23	578	576,053	63,85	0	4,053
24	544	576,053	100	0	38,053

Ce tableau représente l'évolution de la demande en énergie durant 24heurs ( $L_t$ ), la puissance totale optimale fournir par les générateurs ( $P_{g,t}$ ), l'état de stockage d'énergie électrique ( $SOC_t$ ) en utilisant l'équation (2-13e), et les états de déchargement et chargement ( $P_t^d$ ), ( $P_t^c$ ) respectivement.

D'après le tableau 2-7, le système de stockage se charge une fois la demande en énergie est diminué jusqu'à que le ESS pleine comme signaler en jaune puis se décharge une fois la demande

s'augmente jusqu'à la valeur minimale de ESS (rouge) avec une minimisation de la fonction de cout de  $6.455310^5$  \$.

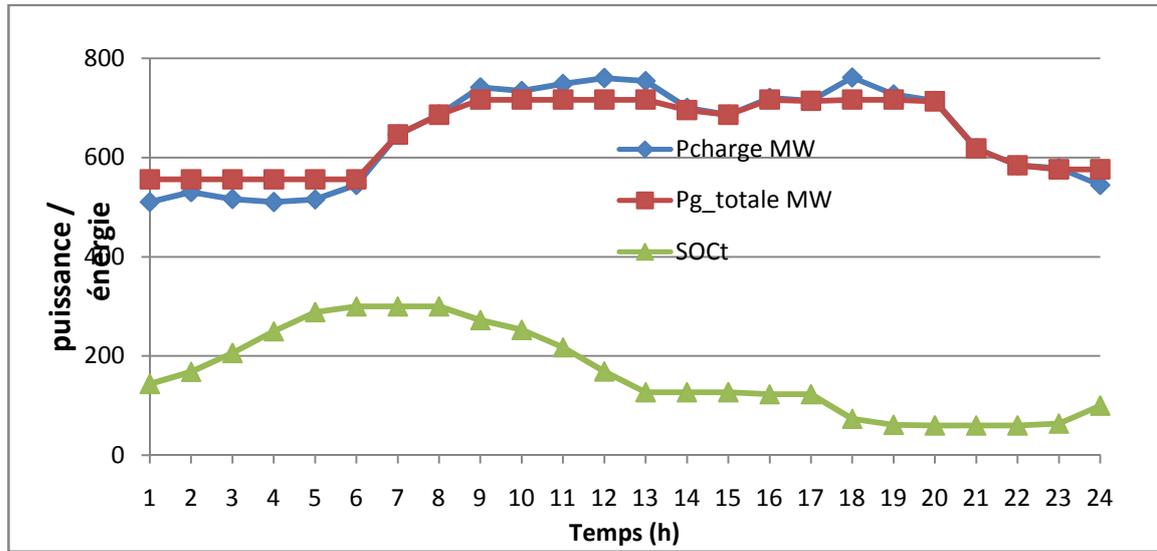


Figure 2-6: Evolution des puissances fournir et consommée et l'état de stockage.

La figure 2-6, montre les variations de la demande d'énergie en fonction de la production et en présence de système de stockage d'énergie électrique. On voit que le ESS commence à stocker l'énergie dès la première heure jusqu'à 6h puisque la demande est inférieure à la production puis se décharge durant la période 9h jusqu'à 14h puisque la demande est supérieure à la production.

La figure2-7 représente les pics de chargement et déchargement de système de stockage ESS durant 24 heures.

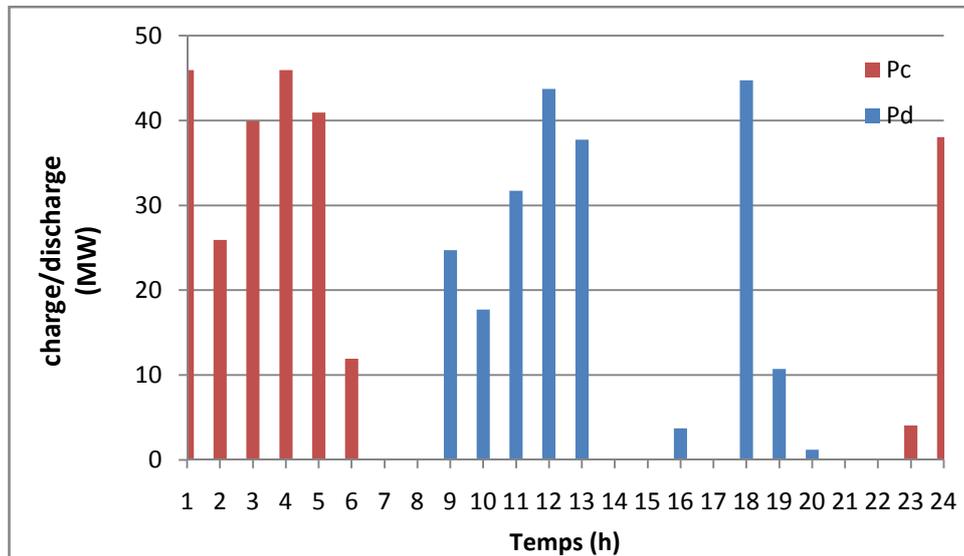


Figure2-7: Pics de chargement et déchargement du ESS

Le tableau 2-8 représente les puissances optimales générées par chaque centrale thermique du système de puissance en présence du ESS.

Tableau 2-8, Puissance générée par les centrales du système étudié

Temps	g1	g2	g3	g4
t1	180,827	122,437	142,162	110,496
t2	180,827	122,437	142,162	110,196
t3	180,827	122,437	142,162	110,496
t4	180,827	122,437	142,162	110,496
t5	180,827	122,437	142,162	110,496
t6	180,827	122,437	142,162	110,496
t7	200	145,853	168,7	131,447
t8	200	159,063	183,671	143,267
t9	200	171,701	190	154,574
t10	200	171,701	190	154,574
t11	200	171,701	190	154,574
t12	200	171,701	190	154,574
t13	200	171,701	190	154,574
t14	200	163,686	188,911	147,403
t15	200	159,063	183,671	143,267
t16	200	171,701	190	154,574
t17	200	170,5	190	153,5
t18	200	171,701	190	154,574
t19	200	171,701	190	154,574
t20	200	168,224	190	154,574
t21	198,266	138,224	160	121,51
t22	189,776	128,754	149,321	116,148
t23	189,156	128,316	148,825	115,756
t24	189,156	128,316	148,825	115,756

La figure2-9 montre l'évolution de la puissance générée optimale de chaque centrale durant 24 heures

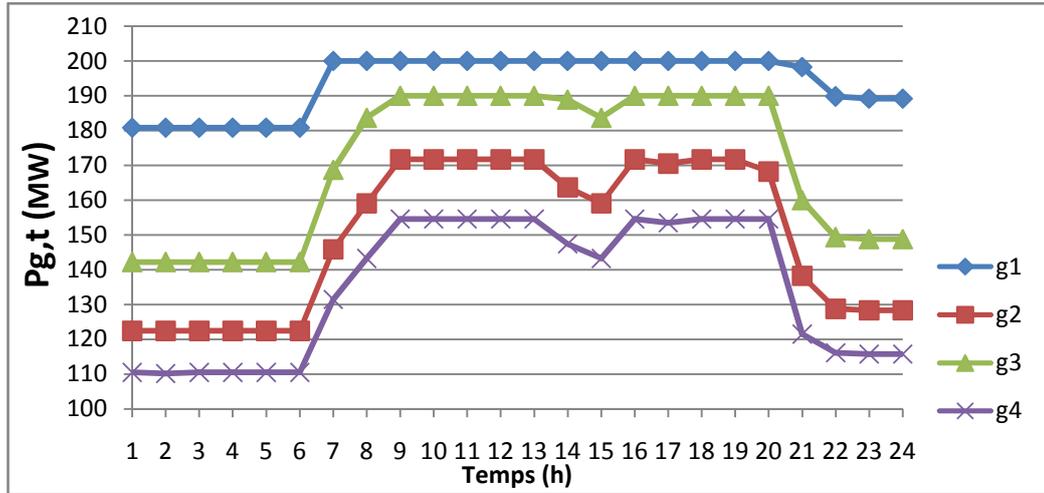


Figure 2-8: Evolution de la puissance générée

### 2.2.4 Dispatching économique avec ESS \_ éolienne

Maintenant, nous allons étudier l'impact du ESS en présence des éoliennes au système de puissance. Les équations correspondantes pour minimiser la fonction objectives TC sont représentées comme suit:

$$\min_{DV} TC = \sum_{g,t} a_g P_{g,t}^2 + b_g P_{g,t} + c_g + \sum_t VWC * P_t^{wc} \quad (2.14a)$$

$$P_g^{min} \leq P_{g,t} \leq P_g^{max} \quad (2.14b)$$

$$P_{g,t} - P_{g,t-1} \leq RU_g \quad (2.14c)$$

$$P_{g,t-1} - P_{g,t} \leq RD_g \quad (2.14d)$$

$$SOC_t = SOC_{t-1} + (P_t^c \eta_c - P_t^d / \eta_d) \Delta_t \quad (2.14e)$$

$$P_{min}^c \leq P_t^c \leq P_{max}^c \quad (2.14f)$$

$$P_{min}^d \leq P_t^d \leq P_{max}^d \quad (2.14g)$$

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad (2.14h)$$

$$P_t^w + \sum_g P_{g,t} + P_t^d \geq L_{t+} P_t^c \quad (2.14i)$$

Après l'exécution du programme représentant les équations d'égalités et d'inégalités représentées ci-dessus pour minimiser la fonction TC en utilisant la méthode QCP. Le tableau 2-9 montre les différents résultats en présence de ESS et éolienne avec  $TC=2.233610^5\$$ .

Tableau 2-9, puissances optimales avec ESS\_ éolien

Temps	$L_t(MW)$	$P_{g,t}(MW)$	$SOC_t(MWh)$	$P_t^d(MW)$	$P_t^e(MW)$	$P_t^w(MW)$
1	32,71	455,7	88,667	10,2	0	44,1
2	34,72	455,7	60	25,8	0	48,5
3	32,71	450,299	60	0	0	65,7
4	32,74	365,1	60	0	0	144,9
5	32,96	315,733	62,88	0	3,032	202,3
6	34,93	286,7	119,88	0	60	317,3
7	44,9	315,733	152,306	0	34,132	364,4
8	52	368,691	152,306	0	0	317,3
9	53,03	410,001	85,639	60	0	271
10	47,26	404,025	60	23,075	0	306,9
11	44,07	323,9	60	0	0	424,1
12	38,63	362	60	0	0	398
13	39,91	266,401	60	0	0	487,6
14	39,45	238,1	117	0	60	521,9
15	41,14	204,7	174	0	60	541,3
16	39,23	219,999	231	0	60	560
17	52,12	239,657	242,834	0	12,457	486,8
18	40,85	328,399	176,168	60	0	372,6
19	41,2	309,049	126,667	44,551	0	367,4
20	41,15	339,7	60	60	0	314,3
21	45,76	301,4	60	0	0	316,6
22	45,59	272,6	60	0	0	311,4
23	45,56	172,599	60	0	0	405,4
24	34,72	115,706	100	0	42,105	470,4

La figure 2-9, représente la puissance optimale totale des générateurs en présence de système de stockage et sources éoliennes, on voit que le ESS stocke l'énergie une fois la demande est faible et la puissance générée par l'éolienne est élevée les différentes évolutions de puissance

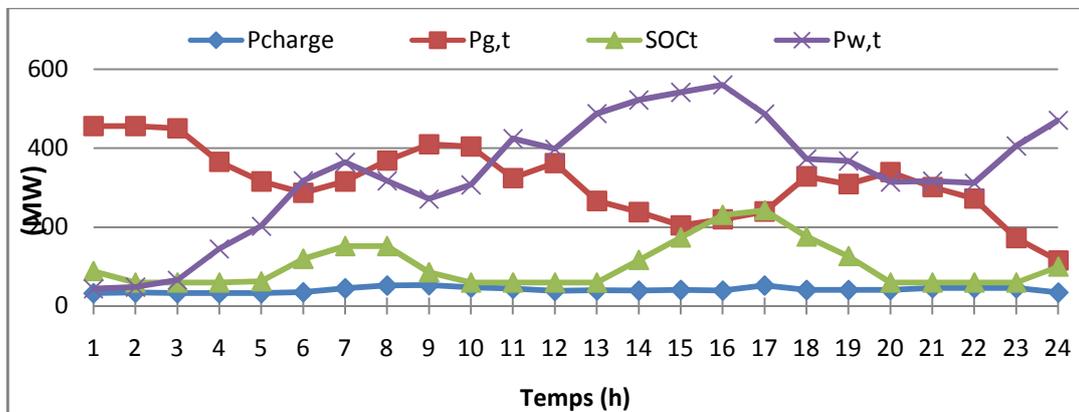


Figure 2-9: Puissance optimale générée en présence de ESS, charge, et éolienne

La figure 2-10 montre les différents pics de l'état de stockage d'énergie électrique de ESS (charge et décharge)

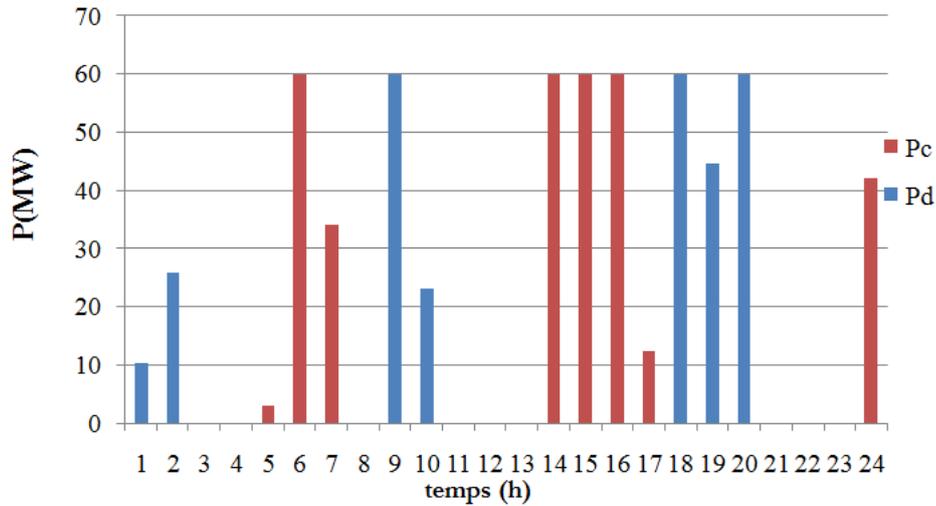


Figure2-10, charge et décharge de ESS

[  $t_1 \rightarrow t_2$  ] : décharge, grande puissance et énergie éolienne après l'augmentation de  $t_2 \rightarrow t_5$  .

[  $t_5 \rightarrow t_7$  ] : charge, la puissance augmente et énergie éolienne diminue.

[  $t_9 \rightarrow t_{10}$  ] : décharge, la puissance diminue et l'énergie éolienne augmente.

[  $t_{14} \rightarrow t_{17}$  ] : charge, la puissance augmente et énergie éolienne diminue. Lorsqu'il y a une demande de consommation d'énergie, la batterie est dans un état de décharge, et lorsque sa consommation atteint une certaine limite, elle est transférée de celle-ci à l'énergie éolienne stockée.

Le tableau 2-10 et la figure2-12, montrent les puissances générées optimale par chaque centrale de production en présence de ESS et éolienne horaires.

**Tableau 2-10** : puissance optimale générée les éolienne-ESS.

Temps	g1	g2	g3	g4
t1	148,884	99,888	116,607	90,321
t2	148,884	99,888	116,607	90,321
t3	147,162	98,673	115,23	89,234
t4	120,007	79,505	93,505	72,083
t5	104,272	68,398	80,917	62,145
t6	95,018	61,866	73,515	56,301
t7	104,272	68,398	80,917	62,145
t8	121,154	80,315	94,423	81,122
t9	134,318	89,607	104,954	79,919
t10	132,413	88,262	103,431	63,79
t11	106,875	70,235	83	71,459
t12	119,019	78,807	92,715	52,215
t13	88,548	57,299	68,339	46,518
t14	79,528	50,932	61,122	39,794
t15	68,883	43,417	52,606	42,874
t16	73,759	46,859	56,507	42,874
t17	80,024	51,282	61,52	46,831
t18	108,309	71,248	84,147	64,695
t19	104,054	68,244	80,743	62,008
t20	111,911	73,79	87,029	66,97
t21	99,704	65,173	77,263	59,26
t22	90,524	58,694	69,919	53,463
t23	58,651	36,195	44,421	33,332
t24	40,481	23,369	30	21,856

On voit que l'évolution de la production optimale de chaque générateur est fonction de la demande et de puissance fournie par l'éolienne et l'état de stockage d'énergie par le ESS.

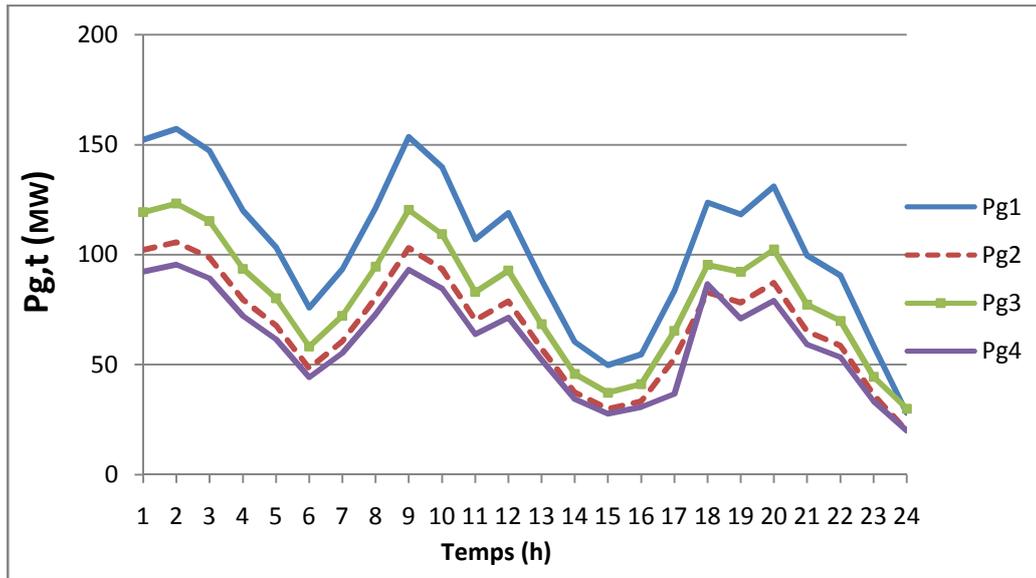


Figure 2-11, évolution optimale de la puissance générée

Tableau 2-11: Une étude comparative

étude	Les couts Totale	Les émission du gaz
Dispatching économique dynamique	$6,4769 \cdot 10^5 \$$	$3,5929 \cdot 10^3$ tonnes
Dispatching économique avec éolienne	$2,2692 \cdot 10^5 \$$	$1,6279 \cdot 10^3$ tonnes
Dispatching économique avec ESS_ éolienne	$2,2336 \cdot 10^5 \$$	$1,1396 \cdot 10^3$ tonnes

D'après le tableau ci-dessous, que le coût et l'émission du gaz sont réduits une fois l'éolienne et le système de stockage sont insérés.

### 2.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les avantages d'insertion des sources renouvelables tels que les éoliennes pour afin d'abaisser l'énergie produite par les sources classiques et diminuer l'écoulement de puissances dans les lignes de transport notamment réduire les pertes. En conséquence abaisser le cout de production. La présence aussi des moyennes de stockage d'énergie électrique est un facteur primordiale pour emmagasiner l'énergie intermittente délivré par la fluctuation du vent et aussi lors de l'écart entre la production et la consommation.

La méthode conventionnelle d'optimisation QCP est effectuée pour minimiser la fonction pour différentes cas étudiés en présence des éoliennes et le système de stockage. Les résultats obtenus montrent clairement l'abaissement de la fonction du cout en présence des sources éoliennes.

## Conclusion générale

### 2.4 Conclusion général

Dans le premier chapitre, nous avons abordé les bases du réseau électrique en évoquant ses principaux concepts, et nous nous sommes concentrés en particulier sur le réseau de transport et son importance en mentionnant aussi les différents types des générateurs asynchrones utilisés dans les sources éoliennes, nous avons mentionnés aussi les moyens de stockage d'énergies pour emmagasiner l'excès de puissance produites soit par les centrales de base ou par les éoliennes. Les méthodes d'optimisation conventionnelles pour minimiser ou maximiser la fonction objective a été étudiée.

Le deuxième chapitre traite les avantages d'insertion des sources renouvelables tels que les éoliennes pour afin d'abaisser l'énergie produite par les sources classiques et diminuer l'écoulement de puissances dans les lignes de transport notamment réduire les pertes. En conséquence abaisser le cout de production. La présence aussi des moyennes de stockage d'énergie électrique est un facteur primordiale pour emmagasiner l'énergie intermittente délivré par la fluctuation du vent et aussi lors de l'écart entre la production et la consommation.

Le flux de puissance optimal (OPF) a également été traité en utilisant la méthode conventionnelle QCP pour minimiser les fonctions objectives tels que la fonction du cout et le facteur utilisé pour le cout de l'éolienne.

## Référence

- [1] Miguel LOPEZ " contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée "). Thèse doctorat ,université Paris Sud11, 2009.
- [2] RH Byrne, TA Nguyen, D.A. Copp, B. R. Chalamala, I. Gyuk "Energy Management and Optimization Methods for Grid Energy Storage Systems " IEEE Access, 6 (2018), pp. 13231-13260.
- [3] Z.Zhang, Y.Zhang, Qi. Huang, W.-J. Lee "Market-Oriented Optimal Allocation Strategy for a Wind Farm with a Multistage Hybrid Energy Storage System" CSEE J Power Energy System, 4(4)(2018), pp. 417-424.
- [4] J.J. Kelly, PG. Leahy "Sizing Battery Energy Storage Systems: Using Multi-Objective Optimization to Overcome the Annual Value Investment Scale Problem IEEE Trans Sustainable Energy", 11 (4) (2020), pp. 2305-2314.
- [5] C. Porte, " Méthodes directes d'optimisation- Méthodes à une variable et Simplex", Techniques de l'ingénieur. Analyse et caractérisation , vol. 1, pp. 229, 2002.
- [6] Antonio, G.E. "Sistemas Eléctricos de Potencia". Pearson Education, Madrid 2003.
- [7] SAYAH Sami, "Application de l'Intelligence Artificielle pour le Fonctionnement Optimal des Systèmes Electriques", Thèse de doctorat en Sciences, Université Ferhat Abbas -Sétif, Algérie.
- [8] Louazne Lakhdar " Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla " .Thèse doctorat , université Batna 2015.
- [9] A.M. Sasson " Non Linear programming Solutions for Load Flow Minimum Losses and Economic Dispatching Problems" IEEE Trans. Power Systems, 1969, vol. PAS-88 pp.399-409.
- [10] J. Barras " Repatition des Puissances et Analyse de Sécurité des Réseaux Electriques par les Méthodes de Flot dans les Graphes" Thèse de doctorat, soutenu en 1988 à l'EPF de Lausanne .
- [11] Y. wallah "Calculation And Program For Power System Networks" Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, 1986.
- [12] IEEE Tutorial Course "OPF : Solution Techniques, Requirements and Challenges" 96TP111-0, 1996 pp. 36-51.

## Référence

- [13] M.S. Osman, M.A. Abo Sinna, A.A. Mousa. A solution to the optimal power flow using genetic algorithm" , International Journal of Applied Mathematics and Computation, Vol. 155, No. 2, August 2004, pp. 391 405.
- [14] O. Alsac, J. Bright, M. Paris, B. Stott , " Further developments in LP based optimal power flow" IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, No. 3, August 1990, pp. 697 711.
- [15] TH 2019 "Contribution à l'optimisation des réseaux électriques en présence des Multi-FACTS par des méthodes méta heuristiques hybrides".
- [16] L. S. Pérez, L. F. Rodriguez et G. A. Olivar, "A Simplified Voltage Stability Index (SVSI)", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 63, pp. 806- 813, 2014.
- [17] S. Lemofouet and A. Rufer, "A Hybrid Energy Storage System Based on Compressed Air and Super capacitors With Maximum Efficiency Point Tracking (MEPT)" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 4, pp. 1105–1115, June 2006.
- [18] R.W. Boom and H. Peterson, "Superconductive Energy Storage for Power Systems," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 8, no. 3, pp. 701–703, September 1972.
- [19] A. Oudalov, T. Buehler and D. Chartouni, "Utility Scale Applications of Energy Storage,"in Proceedings of the IEEE Energy 2030 Conference (ENERGY'08), pp. 1–7, Atlanta, USA, 17–19 November 2008.
- [20] Alireza Soroudi "Power System Optimization Modeling in GAMS" 2017.
- [21] help Guide de GAMS
- [22] Joshua Adam Taylor "Convex optimization of electrical systems" Cambridge University Press ,12/02/2015.

## Annexe

Implémentation du Programme d'écoulement de puissance optimal pour une fonction de minimisation du cout utilisé l'outil de programmation GAMS

Sets t hours / t1\*t24 /

i thermalunits / g1\*g4 / ;

table gendata (i,\*) generator cost characteristics and limits

	a	b	c	d	e	f	Pmin	Pmax	RU0	RD0
g1	0.12	14.80	89	1.2	-5	3	28	200	40	40
g2	0.17	16.57	83	2.3	-4.24	6.09	20	290	30	30
g3	0.15	15.55	100	1.1	-2.15	5.69	30	190	30	30
g4	0.19	16.21	70	1.1	-3.99	6.2	20	260	50	50;

Parameter demand (t)

/t1 510

t2 530

t3 516

t4 510

t5 515

t6 544

t7 646

t8 686

t9 741

t10 734

t11 748

t12 760

t13 754

t14 700

t15 686

t16 720

t17 714

t18 761

t19 727

t20 714

t21 618

t22 584

t23 578

t24 544/;

Variables OBJ Objective (revenue)

costThermal Cost of thermal units

p(i,t) Power generated by thermal power plant

EM Emission calculation;

p.up(i,t) = gendata (i,"Pmax");

p.lo(i,t) = gendata (i,"Pmin");

Equations Genconst3 , Genconst4 ,costThermalcalc ,balance ,EMcalc;

costThermalcalc .. costThermal =e= sum((t,i) , gendata(i,'a')\*power(p(i,t),2)  
+gendata(i,'b')\*p(i,t) + gendata(i,'c'));

Genconst3(i,t) .. p(i,t+1)-p(i,t) =l= gendata(i,'RU0');

Genconst4(i,t) .. p(i,t-1)-p(i,t) =l= gendata(i,'RD0');

balance(t) .. sum(i,p(i,t)) =g= demand(t);

EMcalc .. EM =e= sum((t,i),gendata(i,'d')\*power(p(i,t),2)+gendata(i,'e')\*p(i,t) + gendata(i,'f'));

Model DEDcostbased /all/;

Solve DEDcostbased us QCP min costThermal;

**Les résultats obtenus**

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
--	-------	-------	-------	----------

----	VAR costTherm~	-INF	6.4796E+5	+INF	.
------	----------------	------	-----------	------	---

	costThermal	Cost of thermal units		
--	-------------	-----------------------	--	--

----	VAR p	Power generated by thermal power plant		
------	-------	--	--	--

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
--	-------	-------	-------	----------

g1.t1	28.000	166.191	200.000	.
g1.t2	28.000	172.565	200.000	.
g1.t3	28.000	168.103	200.000	EPS
g1.t4	28.000	166.191	200.000	EPS
g1.t5	28.000	167.784	200.000	1.000E-11
g1.t6	28.000	177.027	200.000	.
g1.t7	28.000	200.000	200.000	-3.360
g1.t8	28.000	200.000	200.000	-7.851
g1.t9	28.000	200.000	200.000	-16.585
g1.t10	28.000	200.000	200.000	-15.329
g1.t11	28.000	200.000	200.000	-17.841
g1.t12	28.000	200.000	200.000	-19.994
g1.t13	28.000	200.000	200.000	-18.918
g1.t14	28.000	200.000	200.000	-9.423
g1.t15	28.000	200.000	200.000	-7.851
g1.t16	28.000	200.000	200.000	-12.817
g1.t17	28.000	200.000	200.000	-11.740

g1.t18	28.000	200.000	200.000	-20.174
g1.t19	28.000	200.000	200.000	-14.073
g1.t20	28.000	200.000	200.000	-12.461
g1.t21	28.000	198.034	200.000	EPS
g1.t22	28.000	189.776	200.000	EPS
g1.t23	28.000	187.864	200.000	-3.15E-11
g1.t24	28.000	177.027	200.000	-1.52E-11
g2.t1	20.000	112.105	290.000	.
g2.t2	20.000	116.605	290.000	.
g2.t3	20.000	113.455	290.000	.
g2.t4	20.000	112.105	290.000	.
g2.t5	20.000	113.230	290.000	.
g2.t6	20.000	119.755	290.000	.
g2.t7	20.000	145.853	290.000	.
g2.t8	20.000	159.063	290.000	.
g2.t9	20.000	184.750	290.000	.
g2.t10	20.000	181.056	290.000	.
g2.t11	20.000	188.444	290.000	.
g2.t12	20.000	194.778	290.000	.
g2.t13	20.000	191.611	290.000	.
g2.t14	20.000	163.686	290.000	.
g2.t15	20.000	159.063	290.000	.
g2.t16	20.000	173.667	290.000	.
g2.t17	20.000	170.500	290.000	.
g2.t18	20.000	195.306	290.000	.
g2.t19	20.000	177.361	290.000	.
g2.t20	20.000	168.602	290.000	.
g2.t21	20.000	138.602	290.000	.

g2.t22	20.000	128.754	290.000	.
g2.t23	20.000	127.404	290.000	.
g2.t24	20.000	119.755	290.000	.
g3.t1	30.000	130.452	190.000	.
g3.t2	30.000	135.552	190.000	.
g3.t3	30.000	131.982	190.000	.
g3.t4	30.000	130.452	190.000	.
g3.t5	30.000	131.727	190.000	.
g3.t6	30.000	139.122	190.000	.
g3.t7	30.000	168.700	190.000	.
g3.t8	30.000	183.671	190.000	EPS
g3.t9	30.000	190.000	190.000	-6.835
g3.t10	30.000	190.000	190.000	-5.579
g3.t11	30.000	190.000	190.000	-8.091
g3.t12	30.000	190.000	190.000	-10.244
g3.t13	30.000	190.000	190.000	-9.168
g3.t14	30.000	188.911	190.000	EPS
g3.t15	30.000	183.671	190.000	EPS
g3.t16	30.000	190.000	190.000	-3.067
g3.t17	30.000	190.000	190.000	-1.990
g3.t18	30.000	190.000	190.000	-10.424
g3.t19	30.000	190.000	190.000	-4.323
g3.t20	30.000	190.000	190.000	-1.489
g3.t21	30.000	160.000	190.000	.
g3.t22	30.000	149.321	190.000	.
g3.t23	30.000	147.791	190.000	.
g3.t24	30.000	139.122	190.000	.
g4.t1	20.000	101.252	260.000	.

g4.t2	20.000	105.278	260.000	.
g4.t3	20.000	102.460	260.000	.
g4.t4	20.000	101.252	260.000	.
g4.t5	20.000	102.258	260.000	.
g4.t6	20.000	108.096	260.000	.
g4.t7	20.000	131.447	260.000	.
g4.t8	20.000	143.267	260.000	.
g4.t9	20.000	166.250	260.000	.
g4.t10	20.000	162.944	260.000	.
g4.t11	20.000	169.556	260.000	.
g4.t12	20.000	175.222	260.000	4.367E-11
g4.t13	20.000	172.389	260.000	.
g4.t14	20.000	147.403	260.000	.
g4.t15	20.000	143.267	260.000	.
g4.t16	20.000	156.333	260.000	.
g4.t17	20.000	153.500	260.000	.
g4.t18	20.000	175.694	260.000	.
g4.t19	20.000	159.639	260.000	1.100E-11
g4.t20	20.000	155.398	260.000	4.560E-11
g4.t21	20.000	121.364	260.000	.
g4.t22	20.000	116.148	260.000	.
g4.t23	20.000	114.940	260.000	.
g4.t24	20.000	108.096	260.000	.

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

---- VAR EM -INF 3.5929E+6 +INF .

EM Emission calculation

\*\*\*\* REPORT SUMMARY : 0 NONOPT

0 INFEASIBLE

0 UNBOUNDED

0 ERRORS

EXECUTION TIME = 0.047 SECONDS

2 MB 25.1.3 r4e34d435fbd WEX-WEI

USER: GAMS Development Corporation, USA G871201/0000CA-ANY

Free Demo, +1 202-342-0180, support@gams.com, www.gams.com DC0000