

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

Baaziz Houcine

Bouaza Mohammed

**Thème:**

Application de la méthode Harmony Search Algorithm pour  
l'optimisation économique et environnementale du réseau  
électrique en présence d'une production photovoltaïque

Soutenu devant le jury composé de :

M <sup>r</sup> Benaouadj Mahdi	MCB	Président	UKM Ouargla
M <sup>r</sup> Boudjella Houari	MCB	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M <sup>me</sup> Ben bouza Naima	MCA	Co-Encadreur	UKM Ouargla
M <sup>r</sup> Bouhadouza boubekour	MAA	Examineur	UKMOuargla

*Année de universitaire : 2022/2021*

# Remerciements

Nous remercier, Dieu Tout-Puissant qui nous a donné le courage et la volonté d'accomplir ce travail de recherche.

Nos remerciements particuliers et appréciations à notre directrice de mémoire Mme. *BNEBOUZA Naima* pour ses conseils et ses orientations dans la réalisation de ce travail, ainsi qu'aux membres de jury qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir étudier avec attention notre travail .

Un merci particulier à notre enseignant Mr BOUDJELLA HOUARI pour avoir eu la patience de répondre à nos questions concernant notre sujet de travail.

Nos sincères remerciements vont à tous les membres du personnel académique et administratif de l'Université de Kasdi Merbah à Ouargla.

Merci à tous ceux qui ont participé, de près ou de loin, pour nous enseigner et nous aider.

Merci à Nos parents, frères et sœurs pour leurs aide et soutien dans le processus éducatif.

## Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes chers parents qui sont pour moi la source de courage, d'inspiration et de motivation et le secret de ma réussite

A mes frères et sœurs et leurs sacrifices tout au long de mon parcours universitaire et à mes chers amis, chacun en son nom pour leur soutien moral et motivationnel

A tous ceux qui m'ont encouragé et aidé à réaliser ce projet

À tous mes enseignants.

## Résumé :

Le fonctionnement du réseau électrique consiste à fournir de l'électricité aux consommateurs à moindre coût, mais il faut aujourd'hui aussi réduire les émissions de gaz provenant de la combustion des matières premières (charbon, gaz naturel, fioul, etc.) dans le système électrique à partir des unités de production.

Dans ce travail, nous présentons un algorithme d'optimisation méta heuristique pour l'optimisation économique et environnementale de la fonction du coût de production et la fonction d'émissions toxiques à fin d'améliorer la transmission de la puissance électrique produite par les centrales thermiques connectées au réseau. Cet algorithme c'est l'algorithme de recherche d'harmonie en anglais Harmony Search Algorithm HSA. C'est une méta heuristique qui s'inspire du processus de recherche de la meilleure harmonie musicale dans un orchestre Le réseau étudié dans ce travail est un réseau à trois unités de production. L'optimisation est faite en deux cas ; le premier en considérant le réseau avec la production classique seulement, puis dans le deuxième cas en considérant le réseau avec une production photovoltaïque connectée au réseau. Les résultats de simulation ont montré d'une part l'efficacité de la méthode HSA dans l'optimisation économique et environnemental des réseaux électrique et d'autre part l'effet de la présence des production à énergie renouvelable dans la chaîne de production d'électricité et cela par la réduction intéressante dans le cout de production et les émissions toxiques.

**Mots-clés :** réseaux électriques , production photovoltaïque, Optimisation économique et environnementale, Méthode HSA (HarmonySearch Algorithm).

## ملخص:

يتكون تشغيل شبكة الكهرباء من توفير الكهرباء للمستهلكين بتكلفة أقل ، ولكن من الضروري اليوم أيضًا تقليل انبعاثات الغاز من احتراق المواد الخام (الفحم والغاز الطبيعي وزيت الوقود وما إلى ذلك) في النظام الكهربائي من وحدات الإنتاج.

في هذا العمل ، نقدم خوارزمية تحسين الكشف عن مجريات الأمور من أجل التحسين الاقتصادي والبيئي لوظيفة تكلفة الإنتاج ووظيفة الانبعاثات السامة من أجل تحسين نقل الطاقة الكهربائية التي تنتجها محطات الطاقة الحرارية المتصلة إلى الشبكة. هذه الخوارزمية هي Harmony Search Algorithm HSA. إنها ميتا هيبوريستية مستوحاة من عملية إيجاد أفضل تناغم موسيقي في أوركسترا ، والشبكة المدروسة في هذا العمل عبارة عن شبكة مكونة من ثلاث وحدات إنتاجية. التحسين يتم في حالتين ؛ الأول من خلال النظر إلى الشبكة ذات الإنتاج التقليدي فقط ، ثم في الحالة الثانية من خلال النظر في الشبكة ذات الإنتاج الكهروضوئي المتصل بالشبكة. أظهرت نتائج المحاكاة من جهة فاعلية طريقة HSA في التحسين الاقتصادي والبيئي

للشبكات الكهربائية ومن ناحية أخرى تأثير وجود إنتاج الطاقة المتجددة في سلسلة إنتاج الكهرباء وهذا من خلال التخفيض المثير للاهتمام في تكلفة الإنتاج والانبعاثات السامة.

الكلمات المفتاحية: الشبكات الكهربائية ، إنتاج الخلايا الكهروضوئية ، التحسين الاقتصادي والبيئي ، طريقة HSA (Harmony Search Algorithm )

## **Abstract**

The operation of the electricity network consists in providing electricity to consumers at a lower cost, but today it is also necessary to reduce gas emissions from the combustion of raw materials (coal, natural gas, fuel oil, etc.) in the electrical system from production units. In this work, we present a heuristic optimization algorithm for economic and environmental optimization of the production cost function and the toxic emission function in order to improve the transmission of electrical energy produced by connected thermal power plants to the grid. This algorithm is Harmony Search Algorithm HSA. It is a meta-heuristic inspired by the process of finding the best musical harmony in an orchestra, and the network studied in this work is a network of three production units. Optimization takes place in two cases; First by looking at the grid with only conventional output, then in the second case by looking at the grid with grid-connected PV output. The simulation results showed, on the one hand, the effectiveness of the HSA method in the economic and environmental improvement of electric networks, and on the other hand, the effect of the presence of renewable energy production in the electricity production chain, through an interesting reduction in the cost of production and toxic emissions. Keywords: electrical networks, photovoltaic production, economic and environmental improvement, HSA method (Harmony Search Algorithm)

**Sommaire:**

Résumé .....	IV
Sommaire.....	II
Liste des figures .....	III
Liste des tableaux .....	III
Liste des symboles.....	V
Introduction générale.....	2
Chapitre I Architecture des réseaux électriques	
I.1. Introduction .....	5
I.2.Hiérarchisation du réseau électrique .....	5
I.2.1 Production .....	6
I.2.2. Transport .....	6
1.2.3 Répartition .....	6
1.2.4 Distribution .....	7
1.2.5 Niveaux de tension .....	7
1.2.6 Topologies des réseaux électriques .....	7
I.3.1 production centralisée .....	9
I.3.1.1. Centrales thermiques à énergies fossiles « non renouvelables » .....	9
I.3.1.2. centrale nucléaire .....	9
I.3.2.Production décentralisée .....	10
I.3.2.1. Energie hydroélectrique .....	10
I.3.2.2. L'énergie photovoltaïque .....	10
I.3.2.3.L'énergie éolienne .....	11
I.3.2.4. La géothermie .....	11
I.3.2.5. La biomasse .....	12
I.3.2.5.La cogénération .....	13
I.3.2.6. Les piles à combustibles .....	14
I.3.3.Conclusion .....	15
Chapitre II Méthode d'optimisation HSA(Harmony search Algorithm)	
II.1. Introduction .....	17
II. 2. Méthodes d'optimisation .....	17
II.2.1 Méthodes exactes .....	17

II.2.3.Méthodes approchées .....	17
II.3.Methode d'optimisation HSA (Harmony Search Algorithm ) .....	18
II.3.1. Description de la methode Harmony Search Algorithme (HSA) .....	19
II.3.2. Règles de la méthode Harmony search Algorithme .....	19
I.3.4. Paramètres de l'algorithme HSA .....	20
II.3.5. Procédure d'optimisation de HSA .....	20
II.4. Conclusion .....	23
Chapitre III Optimisation économique et environnementale du réseau électrique par la méthode HSA (Harmony Search Algorithme)	
III.1. Introduction .....	24
III.2. formulation du problème .....	24
III.2.1 Fonction économique .....	24
a) Fonction du coût de la production thermique.....	24
b) Fonction du coût de la production de la mini-centrale photovoltaïque.....	24
III.2.2 .2. Fonction environnemental.....	26
III. 3. 1. Optimisation bi-objective et mono-objective .....	26
III.4.Application .....	27
III. 4. 1.Simulation .....	28
III.4.2.Comparaison des résultats des deux cas ( sans PV et avec PV) .....	331
III.4. 3.Conclusion .....	32
Conclusion générale .....	32
Références .....	37

**Liste des figures**

Figure 1.1 Vue globale du réseau électrique .....	5
Figure .1.2 Réseau maillé .....	8
Figure 1.3 Réseau bouclé.....	8
Figure.1.4 Réseau radial .....	8
Figure.1.5 Réseau arborescent.....	8
I.3. production centralisée et décentralisé de l'énergie électrique .....	9
Figure I.6 Centrale nucléaire .....	9
Figure I.7 fonctionnement d'une centrale hydroélectrique .....	10
Figure I.8 Toit solaire .....	11
Figure I.9 Centrale photovoltaïque.....	11
Figure I.10 énergie éolienne .....	11
Figure I.11 Energie géothermique .....	12
Figure I.12 utilisation de la biomasse pour produire l'électricité.....	13
Figure I.13 Technique de la cogénération .....	14
Figure I.14 fonctionnement de la pile à combustible .....	15
Figure II.1 méthodes d'optimisations.....	18
Fig. II.2. Procédure d'optimisation de HAS .....	22
Figure III.1 : Variation du couut total en fonction du nombre d'itérations.....	30



**Liste des tableaux**

Tableau. III-1 Coefficients de coût et limites des puissances générées.....	27
Tableau III-2 Coefficients caractéristiques des émissions de NOx.....	28
Tableau III-3 Résultats optimaux .....	29
Tableau III. 4 Résultats optimaux en présence de la production PV.....	31
Tableau III.5 résultats optimaux pour les deux cas ( sans PV et avec PV) .....	31

**Liste des symboles**

**HT (HV) :** Haute tension (High voltage), des tensions composées supérieures comprises entre 33 kV et 220kV .

**MT (MV) :** Moyenne tension (Medium voltage), des tension composées comprises entre 1 kV et 33 kV.

**BT (LV) :** Basse tension (Low voltage), tension comprise entre 100 V et 1 kV.

**TBT (VLV) :** Très basse tension (Verylow voltage), inférieure à 100 V.

**HS :** Harmony Search ( recherche harmonie)

**HM :** Harmony Memory ( mémoire l'harmonie)

**HMS :** Harmony Memory Size (Taille de la mémoire de l'harmonie)

**HMCR :** Harmony Memory Consedering Rate (taux considéré de la mémoire d'harmonie)

**PAR :** Pitch Adjusting Rate (taux d'ajustement)

$F_{pvj}(P_{pvj})$  : est la fonction du coût de la min-centrale photovoltaïque,

$P_{pvj}$  : est la puissance générée par la centrale photovoltaïque au nœud j,

$d_j$  : est le coefficient du coût propre à la min-centrale photovoltaïque et  $nf$  nombre total de min-centrale photovoltaïque.

$f(x)$  : Fonction à optimiser.

$P_d$ : Puissance active de charge totale.

$P_L$ : Pertes actives totales dans le réseau.

$P_{Gi min}$ : Puissance minimale active du générateur.

$P_{Gi max}$ : Puissance maximale active du générateur.

$a_i, b_i, c_i$  : Coefficients de Fonctions Coût.

$\alpha_i \beta_i \gamma_i$ : Coefficients de Fonction des Emissions.

# **Introduction Générale**

### Introduction générale

Le problème d'optimisation économique-environnemental des réseaux électriques consiste à la détermination des niveaux de production des centrales électrique pour assurer l'équilibre entre la production et la consommation avec la considération du coût de production et la réduction des émissions de gaz à effet de serre en satisfaisant toute la demande avec toutes les contraintes du système. En général, les combustibles utilisés dans les centrales thermiques (charbon, mazout, gaz naturel ...) ont des effets négatifs sur l'environnement car ils produisent du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), du dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) et de l'oxyde nitreux ( $\text{NO}_x$ ), qui provoquent les effets toxiques. [1]

Le développement rapide de l'art de l'informatique numérique a maîtrisé le problème d'optimisation en développant plusieurs algorithmes pour déterminer la quantité d'énergie qui peut être générée par les centrales pour répondre aux exigences des consommateurs aussi économiquement que possible tout en respectant les contraintes du système pour toutes les stations.

D'après la synthèse bibliographique, on a constaté que les méthodes de l'intelligence artificielle sont largement utilisées pour résoudre le problème du dispatching économique et environnemental de l'énergie électrique. [2]

Dans ce travail on s'est intéressé à une méthode méta heuristique appelée HSA (Harmony Search Algorithm) pour effectuer une optimisation économique environnementale du réseau électrique.

A l'inverse de certaines méthodes méta heuristique qui s'inspirent des phénomènes naturels, la méthode HSA (Harmony Search Algorithm) est une méthode méta heuristique qui s'inspire du processus de recherche de la meilleure harmonie musicale dans un orchestre. Chaque musicien joue une note avec des différents instruments musicaux à la fois pour trouver l'harmonie parfaite dans l'intervalle des tons possibles ce qui donne un vecteur d'harmonie. Si le résultat obtenu est une bonne harmonie, l'expérience est « sauvegardée » dans la mémoire de chaque musicien ce qui augmente la possibilité d'obtenir une bonne harmonie à la prochaine improvisation. De façon similaire, en ingénierie, chaque variable de décision prend une valeur dans l'intervalle des valeurs possibles ce qui donne un vecteur d'une solution. Si toutes les valeurs des variables de décision représentent une bonne solution, l'expérience est sauvegardée en mémoire de chaque variable ce qui augmente la possibilité d'obtenir une bonne solution à l'itération suivante. Le travail présenté dans ce mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la définition des architectures des réseaux électriques, des modes de production centralisé et décentralisé , de transport, de distribution, etc.

Le deuxième chapitre consiste à la présentation de la méthode d'optimisation HSA(HarmonySearchAlgorithm) ; le principe, le processus et les règles de la méthode

Le troisième chapitre est consacré à l'application de la méthode HSA pour l'optimisation économique environnementale des réseaux électrique avec la présence d'une production photovoltaïque

Une conclusion générale sur le travail fait est donnée à la fin de ce mémoire.

**Chapitre I**  
**Architecture des réseaux**  
**électriques**

### I.1. Introduction

L'énergie électrique est une partie essentielle de notre vie quotidienne, et cela ressort de la grande quantité d'appareils qui nous entourent. L'exploitation du réseau électrique consiste en la production, le transport et la distribution de la puissance nécessaire aux charges installées. La production et la distribution d'énergie est avant tout une entreprise économique cherchant toujours à produire au moindre coût. Par conséquent, la transmission de charge économique est l'une des tâches importantes de toute opération. Le réseau contient généralement de nombreuses centrales électriques qui devraient être en mesure de répondre à la demande. Ces centrales se distinguent d'une part par des coûts de production différents (en fonction des matières premières et de la technologie) et d'autre part également des distances de « centre de gravité » différentes pour ces centrales (plus la centrale est éloignée, plus le coût de transport est élevé). Par ailleurs, il convient de noter que la puissance générée doit être exactement égale à la puissance requise. Ainsi, le dispatching économique doit prendre en compte toutes ces contraintes afin de répartir la charge sur les différentes centrales afin de répondre à la charge au moindre coût. [1]

### I.2. Hiérarchisation du réseau électrique

Un réseau électrique est un ensemble d'outils destiné à produire, transporter, distribuer l'énergie électrique et veiller sur la qualité de cette énergie, notamment la continuité de service et la qualité de la tension. L'architecture ou le design du réseau est un facteur clé pour assurer ces objectifs. Cette architecture peut être divisée en deux parties ; D'une part, l'architecture du poste, et de l'autre part l'architecture de la distribution. La Figure I.1 illustre une vue globale du réseau électrique. On distingue quatre niveaux : production, transport, répartition et distribution [1]

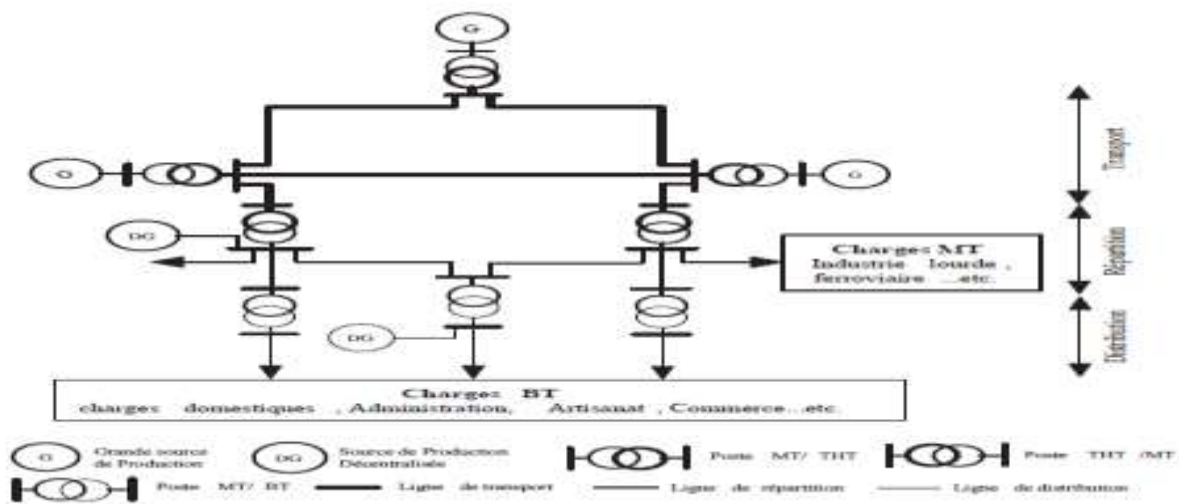


Figure1.1 : Vue globale du réseau électrique

### **I.2.1 Production**

Les grands groupes de production d'énergie électrique sont en général basés sur des alternateurs synchrones de grandes tailles entraînés par des turbines à vapeur, à gaz ou hydrauliques. Ils sont connectés sur le réseau de transport via un transformateur de groupe.

L'ordre de grandeur de la puissance active produite par ces groupes est compris entre 100 MW pour les centrales thermiques de faibles puissances et 1650 MW pour les plus puissantes tranches des centrales nucléaires [2]. La production peut être classée suivant le type d'énergie primaire utilisée pour générer de l'électricité [1] [2]

### **I.2.2. Transport**

Les réseaux de transport assurent le transport de l'énergie électrique sur de grandes distances. Afin de minimiser, entre autre, les pertes joules sur les lignes, ces réseaux sont à très haute tension (de 400 kV à 60 kV). Du point de vue topographique, pour des raisons de sécurité de fonctionnement, les réseaux de transport sont des réseaux maillés ou interconnectés afin de collecter l'électricité produite par les centrales importantes et de l'acheminer par grand flux vers les zones de consommation (fonction transport), et de permettre une exploitation économique et sûre des moyens de production en assurant une compensation des différents aléas (fonction interconnexion).

La structure de ces réseaux est essentiellement de type aérien. Les protections de ces réseaux doivent être très performantes car ces lignes sont vitales pour la stabilité et la sécurité du système tout entier. Les flux de puissance peuvent ainsi être répartis entre toutes les lignes du réseau. Leur gestion est par contre complexe : les transferts de puissance entre zones de production et zones de consommation sont très importants et variables. Ce qui rend l'optimisation technico-économique des réseaux difficiles. Par conséquent, de manière générale, les réseaux de transport, comparativement aux réseaux de distribution, sont très supervisés afin de pouvoir effectuer des contrôles de la tension, de la fréquence, la répartition des flux de puissance et des coûts de production, etc .[3]

### **1.2.3 Répartition**

Le réseau de répartition prend sa source dans le réseau de transport à partir des poste d'interconnexion THT/HT(MT) et sert à fournir les gros consommateurs industriels sous haute ou moyenne tension, et à répartir les puissances dans différentes régions rurales ou urbaines. Ce type de réseau utilise des typiques 60 et 30 kV.



### **1.2.4 Distribution**

Les réseaux de distribution constituent l'architecture la plus importante du système électrique. Ils assurent la distribution de l'énergie électrique au niveau local. Leur tension est inférieure ou égale à 50 kV (HTA). Ils sont constitués de deux types de réseaux :

Le réseau moyenne tension (MT) avec un niveau de 10 kV et 30 kV connecté au réseau de transport, et le réseau basse tension (BT) de tension de 0.4 kV. Le réseau BT constitue le dernier maillon du système électrique. Ses tronçons sont raccordés au réseau MT dans des postes de transformation HTA/BT. Ces niveaux de tension offrent un compromis technico- économique qui permet à la fois, de diminuer les chutes de tension, de minimiser le nombre de postes source (poste de connexion (HTB/HTA) mais également de limiter les contraintes techniques et économiques inhérentes aux hautes tensions.

### **1.2.5 Niveaux de tension**

Les niveaux de tension utilisés diffèrent d'un type de réseau à un autre et diffèrent d'un pays ou d'une région à une autre. Selon la norme IEC (International Electrotechnical Committee) les niveaux de tension sont définis comme suit

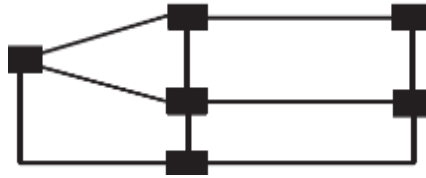
- HT (HV) : Haute tension (High voltage), des tensions composées supérieures comprises entre 33 kV et 220kV .
- MT (MV) : Moyenne tension (Medium voltage), des tension composées comprises entre 1 kV et 33 kV.
- BT (LV) : Basse tension (Low voltage), tension comprise entre 100 V et 1 kV.
- TBT (VLV) : Très basse tension (Verylow voltage), inférieure à 100 V.

### **1.2.6 Topologies des réseaux électriques**

Les topologies diffèrent d'un type de réseau à un autre. Cette topologie est dictée par : le niveau fiabilité recherché, la flexibilité et la maintenance, ainsi que les coûts d'investissement et d'exploitation. Les différentes topologies qu'on trouve usuellement sont :

#### **Réseau maillé**

Cette topologie est presque la norme pour les réseaux de transport. Tous les centres de production sont liés entre eux par des lignes THT au niveau des postes d'interconnexion, ce qui forme un maillage. Cette structure permet une meilleure fiabilité mais nécessite une surveillance à l'échelle nationale voire continentale



**Figure .1.2 : Réseau maillé**

**Réseau bouclé**

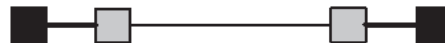
Cette topologie est surtout utilisée dans **les réseaux de répartition et distribution MT**. Les postes de répartition HT ou MT alimentés à partir du réseau THT sont reliés entre eux pour former des boucles ceci dans le but d'augmenter la disponibilité. Cependant, il faut noter que les réseaux MT ne sont pas forcément bouclés.



**Figure 1.3 : Réseau bouclé**

**Réseau radial**

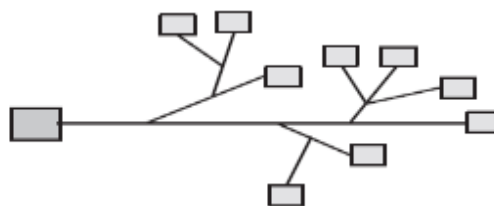
C'est un topologie simple qu'on trouve usuellement dans la distribution MT et BT. Elle est composée d'une ligne alimentée par des postes de distribution MT ou BT alimentés au départ par un poste source HT ou MT. En moyenne tension cette structure est souvent alimentée des deux côtés afin d'assurer la disponibilité.



**Figure.1.4 : Réseau radial**

**Réseau arborescent**

Cette structure est très utilisée en milieu rural et quelque fois en milieu urbain où la charge n'est pas très sensible aux interruptions. Elle est constituée d'un poste de répartition qui alimente plusieurs postes de distribution (BT) grâce à des piquages à différents niveaux des lignes alimentant les postes MT/BT



**Figure.1.5 : Réseau arborescent**

### I.3. production centralisée et décentralisée de l'énergie électrique

#### I.3.1 production centralisée

##### I.3.1.1. Centrales thermiques à énergies fossiles « non renouvelables »

Les technologies utilisant ces énergies primaires ou fossiles (gaz, charbon, pétrole) sont nombreuses et bien éprouvées, ce qui leur confère un grand intérêt économique. Les principales technologies sont:

- Le thermique à flamme, basé sur des turbines ou micro turbines à vapeur;
- les turbines à gaz et cycles combinés de cogénération ou tri génération;
- les moteurs atmosphériques, diesel, etc.

##### I.3.1.2. centrale nucléaire

Une centrale nucléaire classique contient un ou plusieurs réacteurs nucléaires, lieu de production de l'énergie, sous forme initiale de chaleur, et un ensemble de systèmes assurant la conversion de cette chaleur en électricité. Dans le réacteur, une fois la réaction initiée, elle s'autoentretient car les noyaux brisés émettent des neutrons qui brisent les noyaux voisins. C'est la « réaction en chaîne », que l'on maîtrise en descendant des barres de contrôle (en métal) qui absorbent une partie des neutrons. La conversion en électricité de la chaleur produite est réalisée de la même manière (sur le principe) que dans une centrale à charbon ou à pétrole. L'échauffement de l'eau produit de la vapeur qui fait tourner une turbine, laquelle génère de l'électricité. [4]

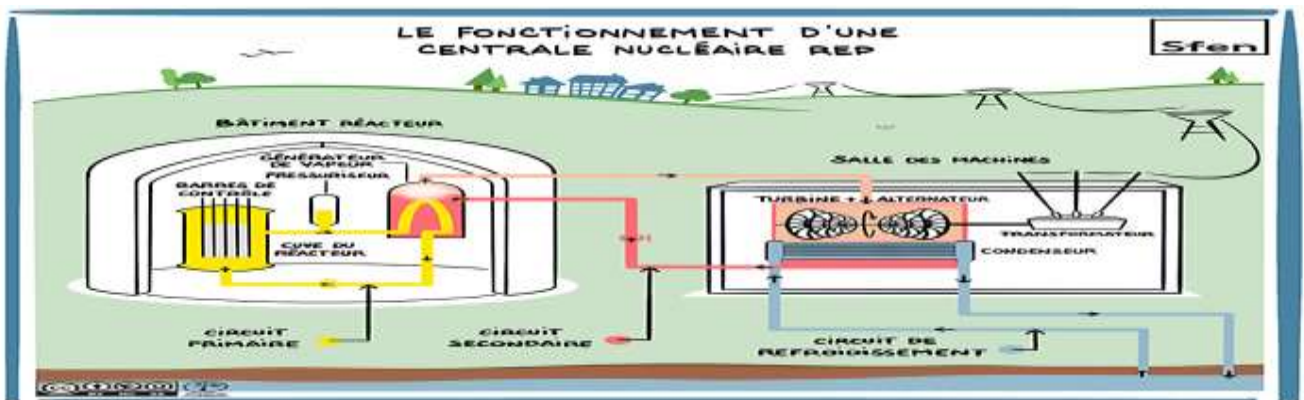
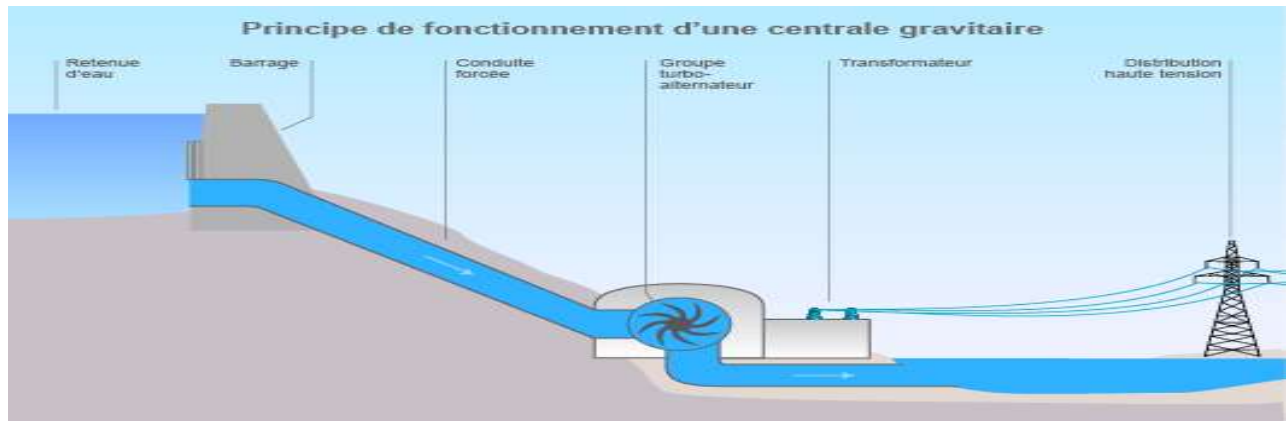


Figure I.6 : Centrale nucléaire

### I.3.2. Production décentralisée

#### I.3.2.1. Energie hydroélectrique

L'hydroélectricité ou énergie hydroélectrique exploite l'énergie potentielle des flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins, etc.). L'énergie cinétique du courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur. L'hydroélectricité constitue la première source renouvelable et la troisième source - toutes filières confondues - de production électrique au monde (15,8% en 2018)(1) derrière le charbon (38%) et le gaz (23,2%). [5]

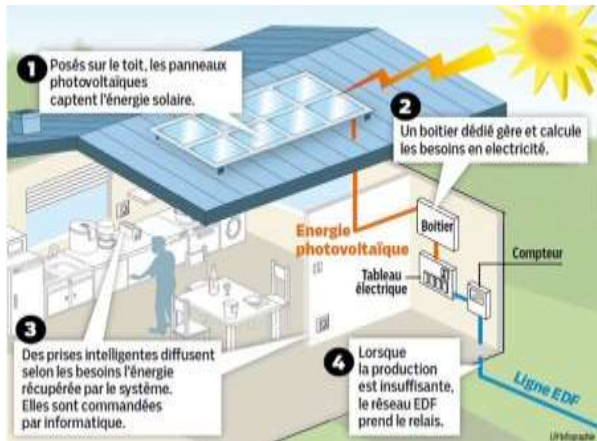


**Figure I.7 :** Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique

#### I.3.2.2. L'énergie photovoltaïque

Les capteurs photovoltaïques convertissent l'énergie de la lumière en électricité en exploitant l'effet photovoltaïque qui apparaît à la jonction des semi-conducteurs. Le rendement énergétique actuellement est compris entre 5 et 16 % selon les technologies de semi-conducteurs utilisés (silicium monocristallin, multi cristallin et amorphe). Du fait que l'électricité produite est continue, l'injection d'électricité sur le réseau se fait au travers d'un onduleur. Les installations photovoltaïques raccordées à un réseau sont de deux types :

- Les toits solaires sont de petites installations de capteurs solaires souvent placées sur les toits de plusieurs maisons raccordées entre elles. L'électricité produite est principalement consommée par l'installation de la maison elle-même. Le surplus d'électricité permet d'alimenter généralement un réseau électrique qui alimente les autres installations desservies par ce réseau.
- Les centrales solaires sont des installations de plusieurs mégawatts, l'électricité produite est destinée à être injectée entièrement sur le réseau. Plusieurs pays (Etats-Unis, Allemagne, Suisse, Espagne, etc.) ont mis en service des centrales solaires dans les années 1990.



**Figure I.8 :** Toit solaire



**Figure I.9 :** Centrale photovoltaïque

### I.3.2.3. L'énergie éolienne

Le mode de fonctionnement des éoliennes est simple. Elles exploitent la force du vent pour entraîner un alternateur asynchrone, plus rarement synchrone, dont la puissance nominale varie entre 200 kW et 2 MW. Les éoliennes peuvent fonctionner dès que le vent est supérieur à 3 m/s et doivent être arrêtées lorsque le vent dépasse la vitesse de 20-25 m/s pour des raisons de sécurité. Dans cette plage de fonctionnement, une régulation de vitesse oriente les pâles de l'éolienne de façon à maintenir une vitesse constante. Les performances d'une éolienne dépendent principalement du vent sur les sites d'implantation souvent remarquables (force du vent constante): bord de mer, en mer (offshore) ou en plaine. Les éoliennes sont souvent connectées au réseau par tranche de deux unités. Dans le cas des générateurs asynchrones, une batterie de condensateurs fournit la puissance réactive absorbée. Parfois, un dispositif d'électronique de puissance assure l'interface avec le réseau électrique. [5]



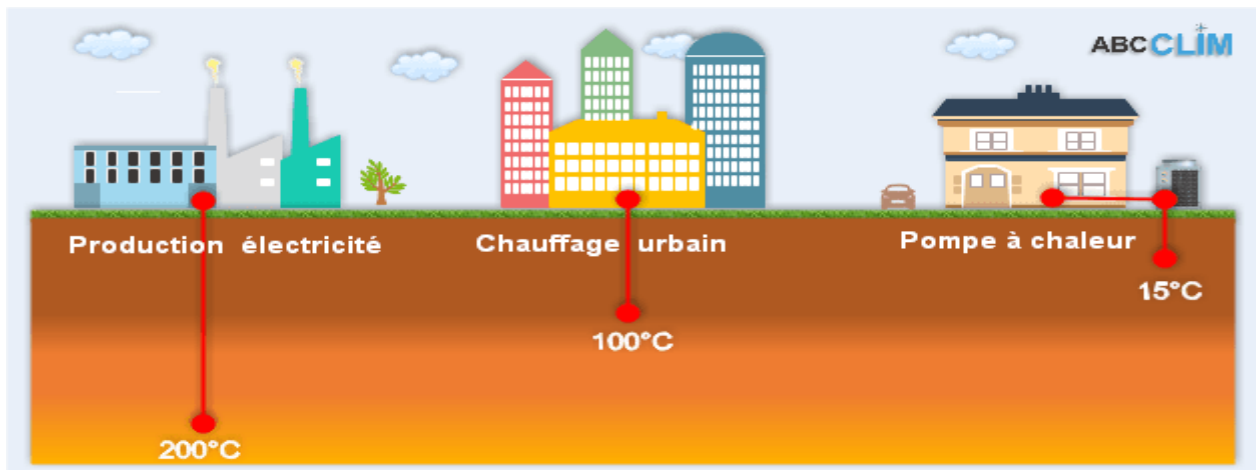
**Figure I.10 :** Energie éolienne

### I.3.2.4. La géothermie

La géothermie (mot issu du grec « gè » = terre et « thermos » = chaud) consiste à extraire l'énergie gratuite contenue dans le sol, sans cesse régénérée par le rayonnement solaire, la pluie, le vent afin de l'utiliser :

- Comme source froide pour le chauffage par pompe à chaleur.
- Sous forme d'eau chaude utilisée pour chauffer directement des habitations.
- Sous forme de vapeur pour produire de l'électricité.

Les centrales géothermique utilisent l'énergie thermique (vapeur) provenant du sous-sol pour produire de l'électricité. De l'eau de pluie ou de mer s'infiltre dans les fractures de la croûte terrestre pour constituer un réservoir dans le sous-sol, appelé nappe aquifère, à haute température, de 150 à 350 °C. Cette énergie thermique dépend du gradient géothermique du lieu et de la profondeur du forage. Grâce à un forage dans le sous-sol, l'eau chaude est pompée jusqu'à la surface. Pendant sa remontée, elle perd de sa pression et se transforme en vapeur. La pression de cette vapeur fait tourner une turbine qui fait à son tour fonctionner un alternateur. Qui produit un courant électrique alternatif. [6]



**Figure I.11 : Energie géothermique**

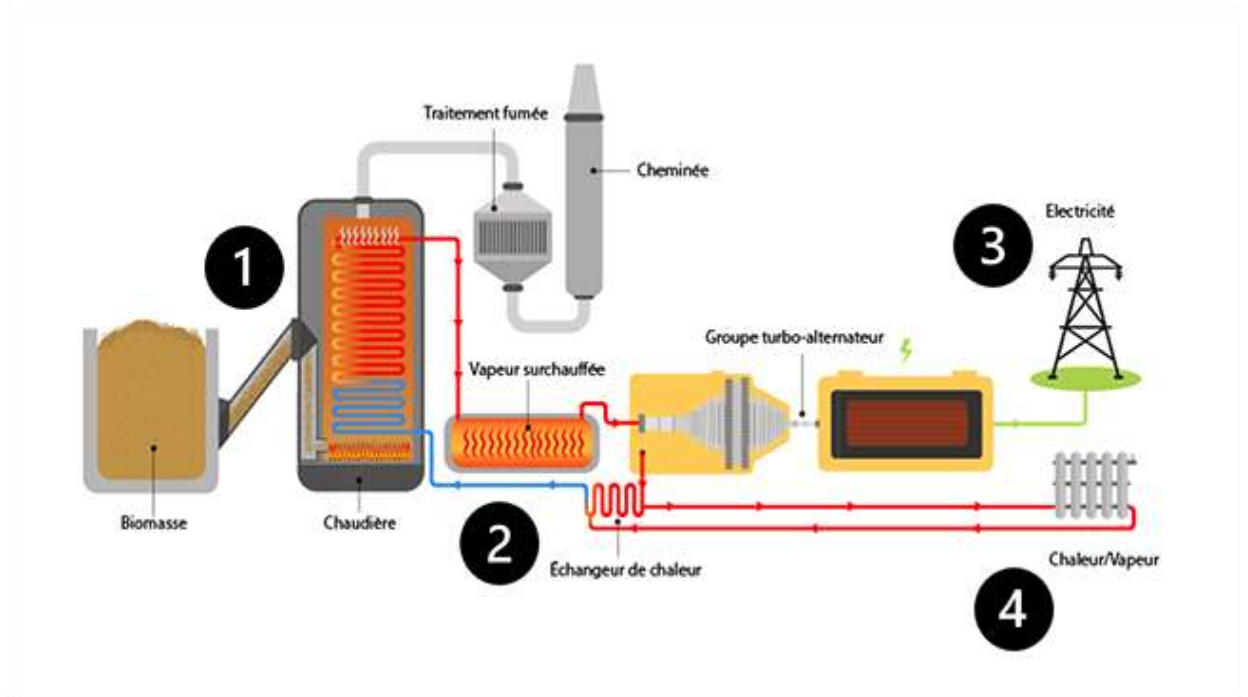
### I.3.2.5. La biomasse

L'énergie issue de la biomasse est une source d'énergie renouvelable qui dépend du cycle de la matière vivante végétale et animale.

L'énergie biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasse. La figure I.12 illustre l'utilisation de la biomasse pour la production de l'électricité.

1. La combustion : La biomasse est brûlée dans une chambre à combustion.
2. La production de vapeur : La biomasse dégage de la chaleur qui va chauffer de l'eau dans une chaudière. L'eau se transforme en vapeur, envoyée sous pression vers des turbines.

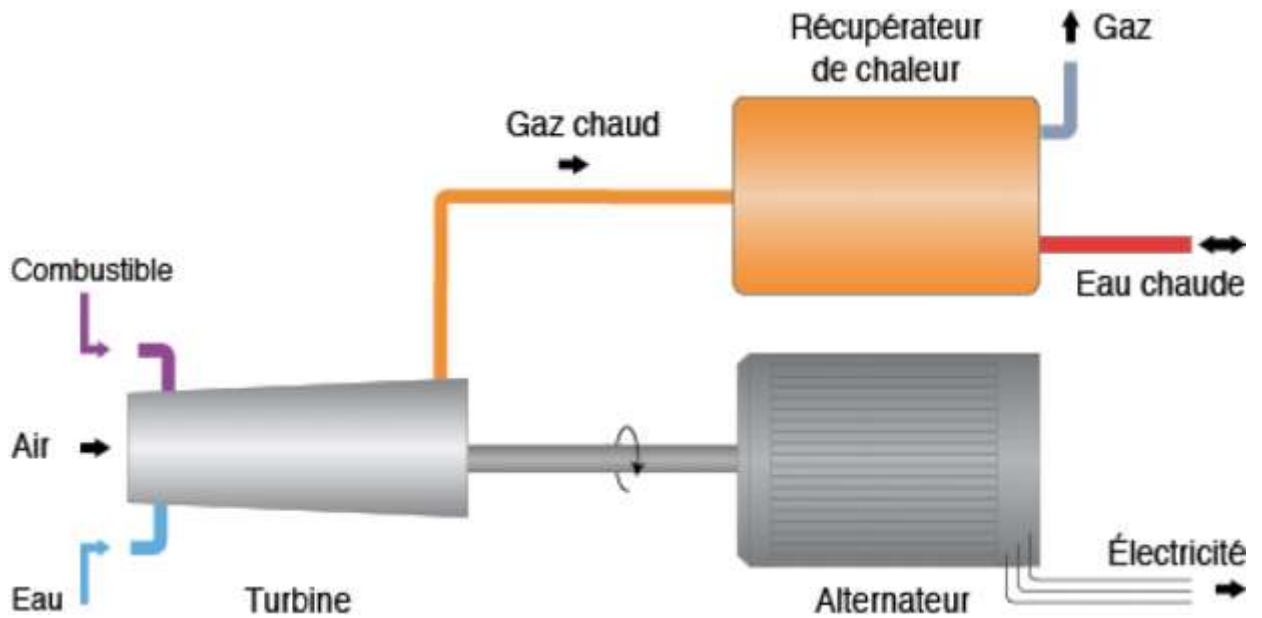
3. La production d'électricité : La vapeur fait tourner une turbine qui fait à son tour fonctionner un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne et haute tension.
4. Le recyclage : A la sortie de la turbine, une partie de la vapeur est récupérée pour être utilisée pour le chauffage. C'est ce que l'on appelle la cogénération.



**Figure I.12 :** Utilisation de la biomasse pour produire l'électricité

### I.3.2.5. La cogénération

La cogénération est la production simultanée de deux formes d'énergie différentes dans la même centrale. Le cas le plus fréquent est la production simultanée d'électricité et de chaleur utile par des moteurs thermiques ou des turbines à gaz. La cogénération est une technique efficace d'utilisation des énergies fossiles et renouvelables, qui valorise une énergie généralement rejetée dans l'environnement, comme la chaleur [7]



**Figure I.13 :** Technique de la cogénération

### I.3.2.6. Les piles à combustibles

Les piles à combustible convertissent directement en électricité l'énergie chimique de combustibles divers (sans combustion), avec de multiples avantages : une grande modularité permettant des montages très variés avec une très grande facilité d'insertion (y compris dans des unités préfabriquées), une flexibilité.

D'installation très forte quel que soit l'emplacement d'utilisation, de grandes facilités de maintenance dues à l'absence de pièces mobiles et à la facilité de remplacement in situ des composants, une absence quasi-totale de dégagement de polluant (de CO<sub>2</sub> en particulier) le seul rejet étant celui d'eau très pure, un rendement élevé de production d'électricité (très supérieur à celui des solutions classiques), un rendement pratiquement indépendant de la charge l'équipement pouvant facilement être très voisin du point d'utilisation, des temps de réponse extrêmement courts, un fonctionnement très silencieux. Le seul obstacle significatif est le coût.

Le fonctionnement des piles à combustibles consiste en sa partie centrale qui est une membrane électrolytique et qui avec :

- . sur la première face une anode (électrode négative repoussant les électrons),
- . et sur la deuxième face une cathode (électrode positive attirant les électrons).

Avec la traversée de l'hydrogène (combustible type), de l'anode vers la cathode.

1. L'hydrogène fourni à la pile pénètre dans celle-ci par la face anodique, où une couche de platine favorise la décomposition de l'hydrogène en électrons et en protons.
2. La membrane électrolytique laisse passer les protons, mais s'oppose au passage des électrons, qui sont recueillis séparément sur la première face afin de fournir le courant électrique.



3. L'oxygène, transitant vers la cathode, y rencontre une autre couche de platine qui provoque la combinaison de l'oxygène avec des électrons, fournissant de l'eau et de la chaleur.[8]

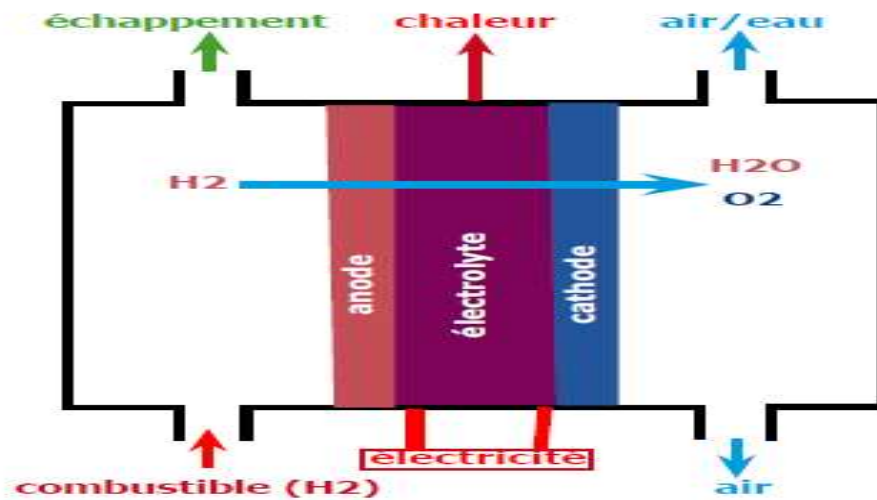


Figure I.14 : Fonctionnement de la pile à combustible

### I.3.3.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons découvert les architectures de réseaux électriques sous plusieurs aspects, notamment la production, la transmission et la distribution, les niveaux de tension et les types de réseaux électriques ainsi que la production d'énergie électrique centralisée concernant les centrales classiques à fossiles et la production décentralisée concernant les énergies renouvelables.

**Chapitre II :**  
**Méthode d'optimisation**  
**HSA(Harmony search**  
**Algorithm)**

## **II.1. Introduction**

L'optimisation est une branche des mathématiques consistant à rechercher des conditions ou des configurations optimales pour des systèmes variés. Ce mot nous vient du latin optimum qui signifie le meilleur. Elle est très importante en analyse numérique et dans les mathématiques appliquées, fondamentales pour l'industrie et l'ingénierie. En effet, lorsque un phénomène économique, physique, chimique... est exprimé par des équations, il est nécessaire d'optimiser le système afin d'obtenir un rendement maximal ou une configuration idéale. Pour cela on utilise des outils mathématiques.

## **II. 2. Méthodes d'optimisation**

Les méthodes de l'optimisation combinatoire peuvent être classées en deux grandes familles de classes : les méthodes exactes et les méthodes approchées. La figure II.1 illustre la taxonomie des méthodes de résolution des problèmes d'optimisation

### **II.2.1 Méthodes exactes**

Une méthode exacte permet de trouver une solution optimale à un problème donné. Toutefois, ces méthodes peuvent devenir rapidement coûteuses en temps d'exécution, notamment pour les problèmes difficiles. En effet, le temps de traitement et la complexité du problème sont généralement liés (plus c'est complexe, plus le temps d'exécution sera important). Ci-dessous, quelques méthodes exactes parmi les plus connues sont : la méthode de séparation et évaluation, la programmation dynamique, et la programmation linéaire.

L'inconvénient majeur de ses méthodes est l'explosion combinatoire : Le nombre de combinaisons augmente avec l'augmentation de la dimension du problème. L'efficacité de ces algorithmes n'est prometteuse que pour les instances de problèmes de petites tailles.

### **II.2.3. Méthodes approchées**

Contrairement aux méthodes exactes, les méthodes approchées ne fournissent pas forcément une solution optimale, mais seulement une bonne solution (de qualité raisonnable) dans un temps raisonnable.

Les méthodes approchées dites aussi Heuristiques ou méta heuristiques permettent de trouver de manière rapide une solution réalisable à un problème donné. Cependant cette solution n'est pas forcément la solution optimale.

L'objectif d'une heuristique est donc de trouver une solution la plus proche possible de celle d'une méthode exacte tout en étant plus rapide. La qualité d'une méthode approchée va donc se calculer par rapport à l'écart obtenu entre sa solution et l'optimale. Plus ce résultat est

proche de la solution optimale,meilleure est l'heuristique.Ies exemples les bien connus des méthodes méta-heuristiques sont : Les algorithmes génétiques, les algorithmes de colonies de fourmis et l'optimisation par essaim de particules présentent.[9]

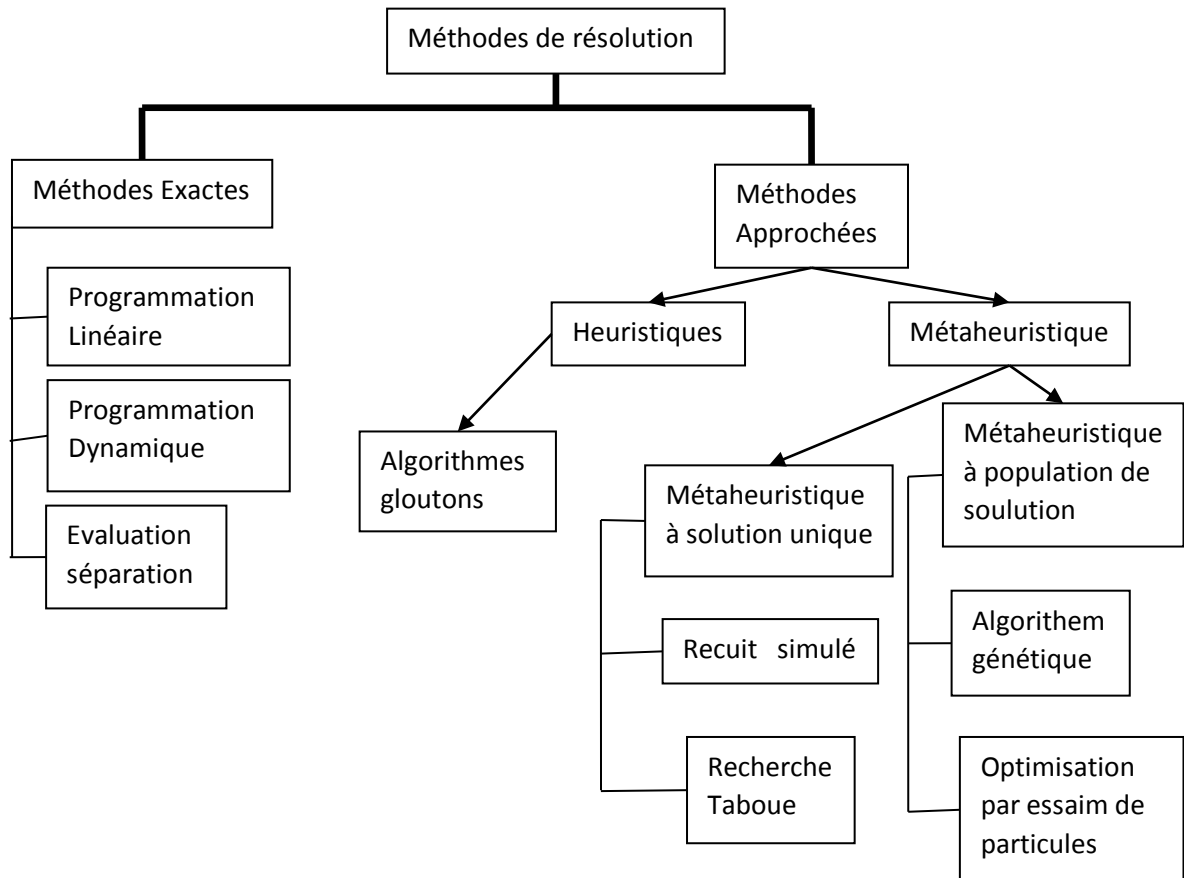


Figure II.1: Méthodes d'optimisations

### II.3.Methode d'optimisation HSA (Harmony Search Algorithm )

A l'inverse de certaine métaheuristique qui s'inspirent des phénomènes naturels, ons'intéressée à uneméta heuristique qui s'inspire du processus de recherche de la meilleure harmonie musicale dans un or-chestre. Chaque musicien joue une note avec des différents instruments musicaux à la fois pour trouver l'harmonie parfaite.Cette métaheuristique s'appelle la recherche d'harmonie, en anglais Harmony Search (HS), proposé et développé par Geem et al [10]. L'HarmonySearch imitant le processus d'improvisation des musiciens. Dans le processus, chaque musicien joue une note dans le but de trouver une meilleure harmonie décrite par l'ensemble [10] [11].

De même que, dans les processus d'optimisation, chaque variable de décision prend une

valeur de façon à avoir une meilleure combinaison (vecteur) de l'ensemble. C'est une métaheuristique relativement nouvelle, dont l'avantage et l'efficacité ont été démontrés dans la littérature dans plusieurs applications [12].

### **II.3.1. Description de la méthode Harmony Search Algorithm (HSA)**

L'algorithme de la recherche d'harmonie HSA (Harmony Search Algorithm) a été conçu en s'inspirant du processus musical de la recherche d'un état parfait de l'harmonie. Les performances musicales cherchent à trouver une harmonie plaisante (l'état parfait) définie par un standard esthétique de la même manière que les processus d'optimisation cherchent à trouver une solution globale (l'état parfait) définie par une fonction objectif. Le ton de chaque instrument de musique détermine la qualité esthétique de la même manière que la valeur de la fonction objective est déterminée par les valeurs prises par chaque variable de décision.

En musique, chaque musicien joue un ton dans l'intervalle des tons possibles ce qui donne un vecteur d'harmonie. Si le résultat obtenu est une bonne harmonie, l'expérience est « sauvegardée » dans la mémoire de chaque musicien ce qui augmente la possibilité d'obtenir une bonne harmonie à la prochaine improvisation.

De façon similaire, en ingénierie, chaque variable de décision prend une valeur dans l'intervalle des valeurs possibles ce qui donne un vecteur d'une solution. Si toutes les valeurs des variables de décision représentent une bonne solution, l'expérience est sauvegardée en mémoire de chaque variable ce qui augmente la possibilité d'obtenir une bonne solution à l'itération suivante.

### **II.3.2. Règles de la méthode Harmony search Algorithm**

La modélisation du processus d'improvisation d'un ensemble de musiciens se base sur les règles qui dirigent chaque interprète dans l'élaboration de l'harmonie. En effet, lorsqu'un musicien improvise un ton, le plus souvent, il suit l'une des trois règles:

- a. jouer un ton de sa mémoire,
- b. jouer un ton adjacent au ton de sa mémoire,
- c. jouer un ton totalement aléatoire dans l'ensemble des sons possibles.

Par analogie, quand HSA affecte une valeur à une variable de décision, il suit l'une des trois règles

- le choix d'une valeur quelconque de la Mémoire des Harmonies (Harmony Memory : HM) : « considération de la mémoire »,
- le choix d'une valeur adjacente à la valeur de HM : « ajustement du ton »,

- le choix d'une valeur totalement aléatoire dans l'intervalle des valeurs possibles : « randomisation ». [12]

### II.3.4. Paramètres de l'algorithme HSA

Les trois règles de HSA sont dirigées en utilisant deux paramètres, qui sont :

- le taux de considération de la mémoire HM (Harmony Memory Considering Rate : HMCR)
- le taux d'ajustement du ton (Pitch Adjusting Rate : PAR). [13]

### II.3.5. Procédure d'optimisation de HSA :

La procédure d'optimisation de HSA est constituée des 5 étapes suivantes

**Etape 1:** Initialisation des paramètres de l'algorithme HSA (HMCR, PAR, ... ) :

Il faut noter que le problème d'optimisation spécifiquement résolu par HSA est sous la forme:

$$\begin{cases} \text{Min} & f(x) \\ \text{avec } x^t & = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N) \\ \text{et } x_i^{\text{MIN}} & \leq x_i \leq x_i^{\text{MAX}} \quad \forall i = 1 \dots N \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Avec  $f(x)$  est la fonction objectif,  $x$  est le vecteur solution du problème,  $x_i$  est la valeur possible de la  $i$ ème variable de décision. Cette valeur bornée par  $x_i^{\text{min}}$  et  $x_i^{\text{max}}$ .  $N$  est le nombre de variables de décision.

Dans cette étape, les paramètres suivants sont définis:

Le taux de considération de la mémoire d'harmonie : Harmony Memory Considering Rate (**HMCR**).

- 1- Le taux d'ajustement du ton : Pitch Adjusting Rate (**PAR**).
- 2- Le critère d'arrêt qui n'est autre que le nombre d'itération de l'algorithme
- 3- La taille du vecteur mémoire contenant les solutions candidates et la valeur de la fonction objectif correspondante. Ce paramètre, appelé **HMS** (HarmonyMemory Size), représente la modélisation de la capacité (taille) de la mémoire des musiciens.

**Etape 2:** Initialisation de HM:

HM est une matrice décrite par l'équation (II.2). Cette matrice est remplie initialement par des solutions générées aléatoirement selon la formule de génération (II.3.).

$$HM = \begin{bmatrix} f(x^1) & (x^1) \\ f(x^j) & (x^j) \\ f(x^{\text{HMS}}) & (x^{\text{HMS}}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

$$x^j = \begin{bmatrix} x_1^j \\ x_i^j \\ x_N^j \end{bmatrix}, x_i^j = x_i^{MIN} + r \times (x_i^{MAX} - x_i^{MIN}) \quad (\text{II.3})$$

rétant un nombre aléatoire dans l'intervalle [0, 1].

**Etape 3:** Improviser une nouvelle harmonie selon le principe suivant:

L'improvisation d'une nouvelle harmonie se fait variable par variable. La valeur de chaque variable de décision est choisie dans HM selon une forte probabilité HMCR sinon elle peut être générée aléatoirement (II.3) selon la probabilité (1-HMCR). Ceci indique que le rôle de HMCR est décisif. En effet, si ce taux est trop petit, la sélection de HM ne se fera que pour une faible population de variables et l'algorithme risque de ne pas converger rapidement. Par contre, si HMCR est trop grand (proche de 1), c'est la génération de nouvelles variables qui sera limitée et donc l'exploration risque d'en souffrir. Pour ces raisons, la valeur typique de HMCR est généralement prise dans l'intervalle [0.7, 0.95] [14].

Toute variable sélectionnée dans HM avec une probabilité HMCR est ajustée selon la probabilité PAR. Cet ajustement (II.4) consiste à remplacer la valeur de la variable courante par une autre valeur de son voisinage.

$$x_i^j = \begin{cases} x_i^j \pm b\omega \text{ avec une probabilité } PAR \\ x_i^j \text{ avec une probabilité } (1 - PAR) \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

**Bw** (bandwidth) est un autre paramètre de l'algorithme à définir. En fait, ce paramètre représente le pas de variation de chaque variable de décision dans son voisinage.

Notons, finalement, que pour toute nouvelle improvisation, chaque variable de décision va se trouver dans l'un des trois cas suivants :

- 1- Générée aléatoirement selon l'équation (II.3).
- 2- Sélectionnée dans HM et gardée inchangée.
- 3- Sélectionnée dans HM et ajustée selon l'équation (II.4).

**Etape 4:** Mise à jour de HM:

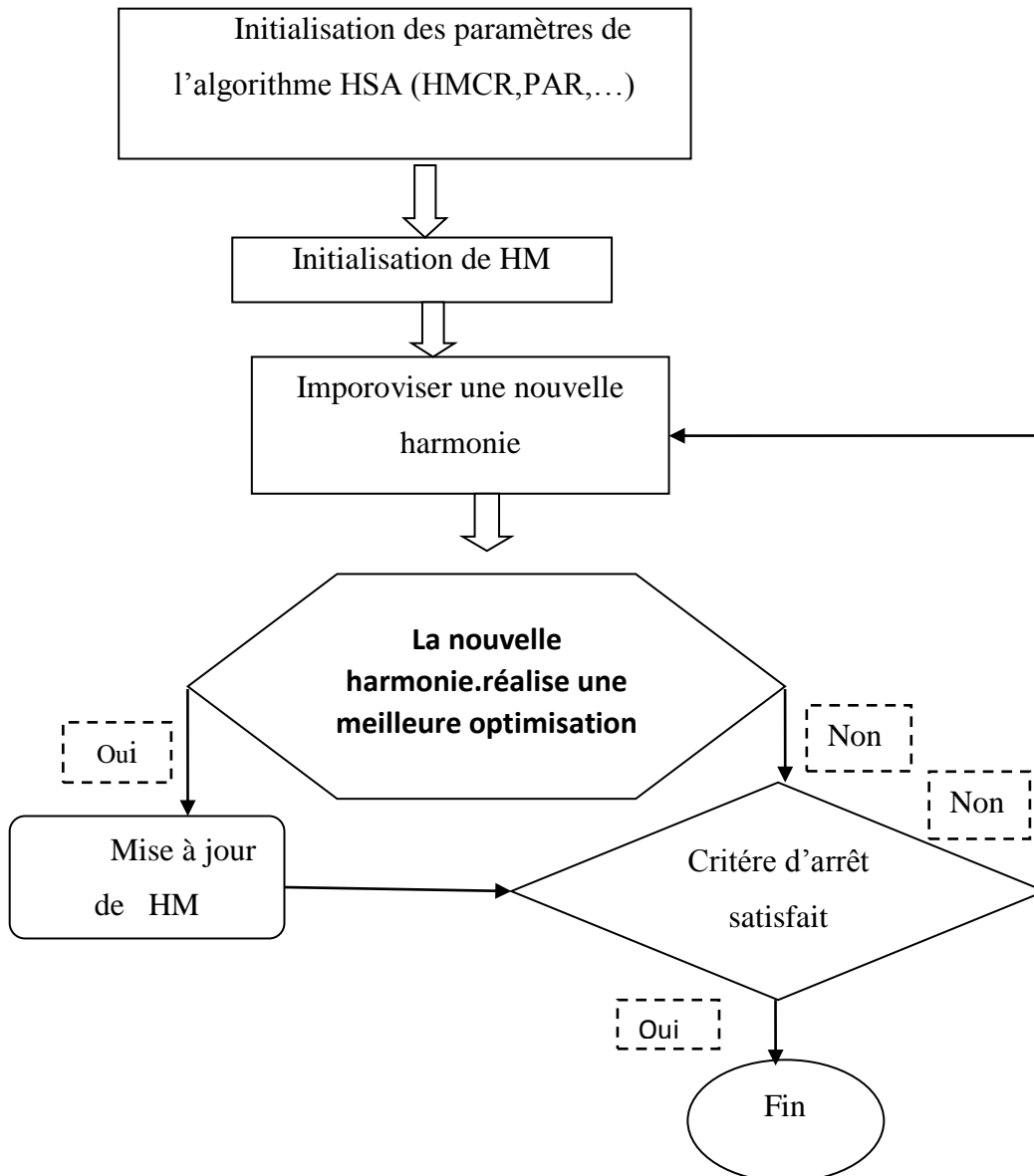
Si la nouvelle harmonie obtenue à l'étape 3 réalise une meilleure optimisation de la fonction objectif, HM est mis à jour en remplaçant la plus mauvaise harmonie qu'il contient par cette nouvelle. [14]

**Etape 5:** Répétition jusqu'à satisfaction du critère d'arrêt:

Répéter les étapes 3 et 4 jusqu'à ce que le nombre d'itérations maximum prédéfini soit atteint .

### II.3.6. Organigramme de la méthode HSA

La procédure d'optimisation de HSA est représentée dans la figure (II.2)



**Figure. II.2 :** Procédure d'optimisation de HAS



#### **II.4. Conclusion**

Les méthodes d'optimisation sont classées en deux types. On trouve les méthodes exactes qui donnent la solution exacte ou optimales et les méthodes approchées qui donnent la solution approchée à la solution exacte. Dans ce chapitre on s'est intéressé à la méthode HSA harmony search algorithme qui est méthode d'optimisation méta heuristique qui s'inspire du processus de recherche de la meilleure harmonie musicale dans un orchestre. On a donné son principe et les différents paramètres sur lesquels se fonde l'opération d'optimisation. L'application de cette méthode HSA dans l'optimisation économique et environnemental des réseaux électriques en présence d'une production photovoltaïque sera l'objectif du chapitre suivant

**Chapitre III :**

**Optimisation économique et  
environnementale du réseau électrique par  
la méthode HSA (Harmony Search  
Algorithm)**

## Chapitre III : Optimisation économique et environnementale du réseau électrique par la méthode HSA (Harmony Search Algorithm)

---

### III.1. Introduction

Dans les systèmes électriques, il est nécessaire de produire à tout moment la puissance électrique nécessaire et une puissance suffisante pour répondre à la demande de la charge, et cette demande varie considérablement le jour et la nuit, ainsi que les saisons et les coûts énergétiques.

La production d'une usine à l'autre par type et efficacité. L'étude économique et environnementale c'est la détermination des niveaux de production pour tous les groupes électrogènes qui assurent un équilibre entre production et consommation au moindre coût tout en réduisant les émissions de gaz toxiques.

### III.2. Formulation du problème

#### III.2.1 Fonction économique

##### a) Fonction du coût de la production thermique

Les producteurs d'énergie électrique déterminent expérimentalement les courbes donnant le coût de production de chaque groupe en fonction de la puissance qu'il débite. La fonction associée à ces courbes est un polynôme de degré «n». En pratique, le plus souvent, elle est présentée sous forme d'un polynôme de deuxième degré :

$$F_{thi}(P_{Gi}) = \alpha_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i (\$/h) \quad i = 1, 2, \dots, n_g \quad \text{(III - 1)}$$

$F_{thi}(P_{Gi})$  est la fonction du coût du combustible,  $P_{Gi}$  est la puissance générée,  $\alpha_i$ ,  $b_i$  et  $c_i$  sont les coefficients du coût propres à chaque unité de production d'énergie électrique et  $n_g$  nombre total de générateurs. [15]

##### b) Fonction du coût de la production de la mini-centrale photovoltaïque

La fonction du coût d'une mini-centrale photovoltaïque peut être représentée par la fonction linéaire suivante :

$$F_{pvj}(P_{pvj}) = d_j P_{pvj} (\$/h) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad \text{(III - 2)}$$

$F_{pvj}(P_{pvj})$  est la fonction du coût de la mini-centrale photovoltaïque,

$P_{pvj}$  est la puissance générée par la centrale photovoltaïque au nœud j,

### Chapitre III : Optimisation économique et environnementale du réseau électrique par la méthode HSA (Harmony Search Algorithm)

---

$d_j$  est le coefficient du coût propre à la min-centrale photovoltaïque et  $nf$  nombre total de min-centrale photovoltaïque.

Le coût de la production photovoltaïque peut être obtenu en se basant sur les équations suivantes:

$$d_{jPV} = aI^p \sum_{j=1}^{nf} (P_{pvj}) + G^E \sum_{j=1}^{nf} (P_{pvj}) \quad (\text{III.3})$$

$$F_{pvj}(P_{pvj}) = aI^p P_{PV} + G^E P_{PV}$$

$$a = \frac{r}{[1 - (1 + r)^{-N}]}$$

Où  $P_{PV}$  est la production de la source d'énergie solaire,  $a$  est le coefficient d'annualisation,  $r$  est le taux d'intérêt (0,09),  $N$  est la durée de vie de l'investissement (20 ans),  $I^p$  est le coût d'investissement par unité de puissance installée et  $G^E$  est le Coût de fonctionnement et de maintenance.  $I^p$  et  $G^E$  sont pris comme 5000 \$/kW et 1,6 cents/kW, respectivement pour les sources d'énergie solaire.

$$F_{pvj}(P_{pvj}) = 547.7483 * P_{PV}$$

La minimisation de la fonction du coût total de production thermique et la production photovoltaïque est présentée comme suit :

$$\text{Min} \left\{ F = \sum_{i=1}^{ng} F_{thi}(P_{Gi}) + \sum_{j=1}^{nf} F_{pvj}(P_{pvj}) \right\} \quad (\text{III.4})$$

Sous les contraintes:

$$\sum_{i=1}^{ng} P_{Gi} + \sum_{j=1}^{nf} P_{pvj} - P_d - P_L = 0 \quad (\text{III.5})$$

$$P_{Gimin} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \quad i = 1, \dots, ng \quad (\text{III.6})$$

$$0 \leq P_{pvj} \leq P_{pvjmax} \quad j = 1, \dots, nf \quad (\text{III.7})$$

$P_d$ : Puissance active de charge totale.

$P_L$ : Pertes actives totales dans le réseau.

$P_{Gimin}$ : Puissance minimale active du générateur.

## Chapitre III : Optimisation économique et environnementale du réseau électrique par la méthode HSA (Harmony Search Algorithm)

---

$P_{Gi\ max}$ : Puissance maximale active du générateur. [16]

### III.2.2 .2. Fonction environnementale

La fonction des émissions des gaz provenant des centrales de production peut être décrite comme suit :

$$E_i(P_{Gi}) = \alpha_i P_{Gi}^2 + \beta_i P_{Gi} + \delta_i (\text{Ton/h}) \quad (\text{III.8})$$

L'étude environnementale consiste à minimiser la fonction des émissions :

$$\text{Min} \{E = \sum_{i=1}^{n_g} E_i(P_{Gi})\} \quad (\text{III.9})$$

Sous les contraintes données par les équations (5) à (7).[17]

### III.3.1. Optimisation bi-objective et mono-objective

L'étude économique-environnemental consistent donc à chercher la minimisation simultanée des deux fonctions décrites par les mêmes variables objets. Le problème d'optimisation représente un problème bi-objectifs ou bi-critères. La difficulté principale d'un tel problème d'optimisation est liée à la présence de conflits entre les deux fonctions. Pour cela, le problème d'optimisation bi-objectifs peut être transformé en un problème d'optimisation mono-objectif, introduisant un facteur pénalité des prix  $F_p$  qui représente le rapport entre le maximum coût du carburant et les émissions maximales du générateur correspondant.

$$F_{Pi} = \frac{F_{thi}(P_{Gi\ max})}{E_i(P_{Gi\ max})} (\$/ton) \quad (\text{III.10})$$

Les étapes suivantes sont utilisées pour trouver le facteur de pénalité de prix pour une demande de charge particulière.

- 1- Trouver le rapport entre le coût de carburant maximum et le maximum Emission  $\frac{F_{thi}(P_{Gi\ max})}{E_i(P_{Gi\ max})}$  de chaque générateur.
- 2- Disposer les valeurs du facteur de pénalité de prix dans l'ordre croissant.
- 3- Ajouter la puissance générée maximale de chaque unité ( $P_{Gi\ max}$ )une par une, en commençant par la puissance de la centrale ayant le plus petit facteur. Une fois  $\sum P_{Gi\ max} \geq P_{ch}$ , on arrête le calcul

## Chapitre III : Optimisation économique et environnementale du réseau électrique par la méthode HSA (Harmony Search Algorithm)

4- A ce stade,  $F_p$  lié à la dernière unité dans le processus de sommation est le facteur de pénalité des prix correspondant à la charge donnée.

Le problème d'optimisation mono-objectif se présente de la manière suivante :

$$\text{Min} \left[ \Psi = \sum_{j=1}^{n_f} F_{pvj}(P_{pvj}) + \sum_{i=1}^{n_g} F_{thi}(P_{Gi}) + F_p \cdot \sum_{i=1}^{n_g} E_i(P_{Gi}) \right] (\$/h) \quad \text{(III.11)}$$

L'équation (III-9) peut être réécrite en fonction des coefficients globales et des puissances générées : [18]

$$\text{Min} \left\{ \Psi = \sum_{j=1}^{n_f} F_{pvj}(P_{pvj}) + \sum_{i=1}^{n_g} A_i P_{Gi}^2 + B_i P_{Gi} + C_i \right\} (\$/h) \quad \text{(III.12)}$$

Avec  $A_i = \alpha_i + F_p \alpha_i$ ,  $B_i = b_i + F_p \beta_i$  et  $C_i = c_i + F_p \delta_i$

### III.4. Application

Le réseau concerné dans cette étude est un réseau à courant alternatif à 9 nœuds comprenant 3 nœuds producteurs .

La charge totale  $P_d$  est de 315 MW pour une puissance de base égale à 100 MVA. Dans ce système, le générateur 1 est une centrale hydroélectrique et les générateurs 2 et 3 sont de type thermique. On considère les pertes de transmission  $P_L$  sont négligeables.

Les valeurs des coefficients des fonctions coût des trois générateurs et les limites sur les puissances générées sont regroupées dans le tableau 1.

**Tableau. III-1 :** Coefficients de coût et limites des puissances générées.

Noeud	$P_{G \min}$ (MW)	$P_{G \max}$ (MW)	$F(P_{Gi}) = \alpha_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i (\$/h)$		
			$\alpha_i$ ( $\$/MW^2h$ )	$b_i$ ( $\$/MWh$ )	$c_i$ ( $\$/h$ )
1	10	250	0.11	5	150
2	10	300	0.085	1.2	600
3	10	270	0.1225	1	335

## Chapitre III : Optimisation économique et environnementale du réseau électrique par la méthode HSA (Harmony Search Algorithm)

---

Les valeurs des coefficients des émissions des gaz [19] sont regroupées dans le tableau III.2.

**Tableau III-2 :** Coefficients caractéristiques des émissions de NOx.

Noeud	$E = (P_{Gi}) = \alpha_i P_{Gi}^2 + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i (\text{ton/h})$		
	$\alpha_i$ (ton/MW <sup>2</sup> h)	$\beta_i$ (ton/MWh)	$\gamma_i$ (ton/h)
1	—	—	—
2	$6.49 * 10^{-6}$	$-5.554 * 10^{-4}$	$4.091 * 10^{-2}$
3	$3.38 * 10^{-6}$	$-3.550 * 10^{-4}$	$5.326 * 10^{-2}$

Le facteur de pénalité de prix est évalué à 46606 \$/ton.

### III. 4. 1.Simulation

Sous l'environnement Matlab on a effectué la simulation de l'optimisation économique et environnementale du réseau électrique étudié. Pour mettre en évidence l'efficacité de la méthode HSA en étant une nouvelle technique d'optimisation, on a effectué l'optimisation de notre fonction objective par la méthode des Algorithmes génétiques (AG) dans le but de comparer les résultats entre les deux méthodes étant donné que la méthode des algorithmes génétique est très répondeuse et utilisée dans la plus part des travaux d'optimisation.

#### Cas simulation du réseau sans production PV

Dans le premier cas on a pris le réseau électrique avec les centrales thermiques seulement. Dans ce cas la fonction objective globale est donnée par l'équation suivante :

$$\text{Min}\{\Psi = \sum_{i=1}^{n_g} A_i P_{Gi}^2 + B_i P_{Gi} + C_i\} \left(\frac{\$}{h}\right) \quad \text{(III.13)}$$

### Chapitre III : Optimisation économique et environnementale du réseau électrique par la méthode HSA (Harmony Search Algorithm)

---

Avec les contraintes suivantes :

$$\sum_{i=1}^{ng} P_{Gi} - P_d = 0 \quad \text{(III. 14)}$$

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \quad i = 1, \dots, ng \quad \text{(III.15)}$$

Les résultats des puissances actives, du taux des émissions et du coût total pour les deux méthodes AG et HSA sont donnés dans le tableau (III-3).

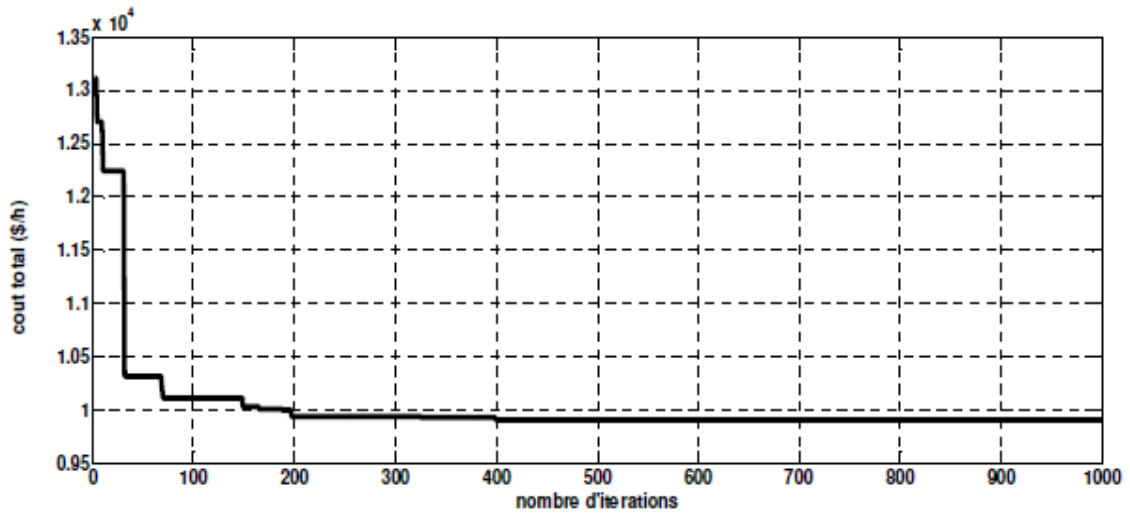
On remarque que les résultats obtenus par la méthode HSA sont proches à ceux obtenus par la technique des AG ce qui peut rassurer la validité de la technique HSA dans le domaine l'optimisation.

**Tableau III-3 : Résultats optimaux**

	AG	HSA
$P_{G1}(\text{MW})$	143.09	143.13
$P_{G2}(\text{MW})$	78.98	78.95
$P_{G3}(\text{MW})$	92.42	92.91
$E(P_{Gi})(\text{kg/h})$	0.08684	0.08695
$T(P_{Gi})(\$/\text{h})$	9903.95	9901.30

La courbe de la figure ( III.1) montre clairement la convergence rapide de la fonction du coût vers la solution optimale.





**Figure III.1 :** Variation du cout total en fonction du nombre d'itérations

**Cas de simulation après l'installation de la production PV**

Pour notre étude on considère une production photovoltaïque  $P_{pv} = 110$  MW

$$F_{pvj}(P_{pvj}) = 0.5477 * P_{PV}$$

La fonction objective sera comme suit :

$$Min\{\Psi = F_{pvj}(P_{pvj}) + \sum_{i=1}^{ng} A_i P_{Gi}^2 + B_i P_{Gi} + C_i\} \left(\frac{\$}{h}\right) \quad \text{(III.16)}$$

Avec les contraintes suivantes :

$$\sum_{i=1}^{ng} P_{Gi} + P_{pv} - P_d = 0 \quad \text{(III.17)}$$

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \quad i = 1, \dots, ng$$

Les résultats de simulation sont donnés dans le tableau III.4.

### Chapitre III : Optimisation économique et environnementale du réseau électrique par la méthode HSA (Harmony Search Algorithm)

---

**Tableau III. 4:** Résultats optimaux en présence de la production PV

	AG	HSA
$P_{G1}$ (MW)	75.23	77.52
$P_{G2}$ (MW)	60.73	60.32
$P_{G3}$ (MW)	69.024	67.14
$E(P_{Gi})$ (kg/h)	0.07596	0.07567
$T(P_{Gi})$ (\$/h)	6743.86	6681.34

#### III.4.2.Comparaison des résultats des deux cas ( sans PV et avec PV)

Les résultats obtenus par la méthode HSA dans les deux cas de simulation sont regroupés dans le tableaux suivant :

**Tableau III.5 :** résultats optimaux pour les deux cas ( sans PV et avec PV)

	Sans PV	Avec PV
$P_{G1}$ (MW)	143.13	77.52
$P_{G2}$ (MW)	78.95	60.32
$P_{G3}$ (MW)	92.91	67.14
$E(P_{Gi})$ (Ton/h)	0.08695	0.07567
$T(P_{Gi})$ (\$/h)	9901.30	6681.34

A travers les résultats obtenus, on peut dire qu'il y a une différence remarquable entre le coût total de production et la quantité des émissions toxiques.

### **Chapitre III : Optimisation économique et environnementale du réseau électrique par la méthode HSA (Harmony Search Algorithm)**

---

Le coût total pour le premier cas est de 9 901.30 \$/h et d'environ 6 681.34 \$/h pour le deuxième cas, soit une différence de 3 219.96 \$/h, ce qui donne une réduction du cout total de (32,52 %).

Les émissions toxiques pour le premier cas sans PV sont évaluées à 0.08695 Ton/h et dans le cas avec PV sont évaluées à 0.07567 Ton/h, ce qui donne une réduction des émissions toxiques de 12.97 % .

#### **III.4.3.Conclusion**

L'optimisation économique et environnementale permet d'évaluer le coût de production électrique dans un réseau électrique et la quantité des émissions toxiques dans l'environnement. L'application de la méthode HSA pour réaliser cette l'optimisation a été fait dans deux cas le premier dans le cas d'un réseau électrique contenant des centrales thermiques et dans le cas d'introduction d'une production photovoltaïque dans la chaine de production électrique. Les résultats de simulation ont montré d'une part la l'efficacité de la méthode HSA dans l'optimisation des systèmes et d'une autre part l'effet de la production PV dans la réduction du coût de production et de la quantité des émissions toxiques

## **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Dans cette étude, après avoir présenté les structures des réseaux électriques ainsi que la production d'énergie centralisée (énergies fossiles, etc.) et décentralisée (énergies renouvelables), on a donné une idée sur les méthodes d'optimisation exactes et heuristiques. On s'est intéressé plus particulièrement à une nouvelle méthode appelée HSA harmony Search Algorithm en français l'algorithme de recherche d'harmonie, qui est une méthode d'optimisation exploratoire inspirée du processus de recherche de la meilleure harmonie orchestrale. Le principe et le fonctionnement de la méthode HSA et ces différents paramètres ont été présentés.

La dernière partie de ce travail a été consacrée à l'application de l'algorithme Harmony Search pour l'optimisation économique et environnementale d'un réseau électrique à 3 unités de production d'énergie électrique. Le but de l'optimisation c'est de réduire le coût du carburant et de réduire le taux des émissions toxiques en optimisant les productions des centrales électriques.

La simulation a été faite sous l'environnement Matlab pour deux cas :

- Le premier cas en considérant le réseau électrique avec les productions classiques seulement.
- Le deuxième cas en ajoutant une production photovoltaïque dans la chaîne de production électrique.

Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de la méthode HSA dans les problèmes d'optimisation économique et environnementale en mettant en évidence l'effet de la présence d'une production photovoltaïque dans la réduction remarquable du coût de production ainsi que les émissions toxique dans l'environnement.

**Références  
bibliographiques**

**Références**

- [1] Farid Hamoudi / Réseaux électrique de transport et de distribution / Université A/Mira-Bejaia Faculté de Technologie Département de Génie Électrique
- [2] B. Berseneff, “Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur”, Thèse de doctorat de L'Université de Grenoble, Décembre 2010.
- [3] L. Hamza, A. Djabbour, “Etude d’intégration d’une production décentralisée dans un réseau de distribution électrique”, Mémoire master académique, Université kasdi merbah Ouargla faculté des sciences appliquées département de génie électrique, 2017.
- [4] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-centrale-nucleaire>
- [5] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricitei>;
- [6] <https://tel.archives.ouvertes.fr/file/index/docid/688663/filename/CANARD>
- [7] <https://www.be-atex.com/actualites/focus/les-centrales-biomasse>
- [8] [https://media.xpair.com/auxidev/nB42a\\_PilesComb Chap:02](https://media.xpair.com/auxidev/nB42a_PilesComb Chap:02)
- [9] [http://www.applis.univ-tours.fr/scd/EPU\\_DI/2014\\_PFEDI\\_Mille.Baptiste](http://www.applis.univ-tours.fr/scd/EPU_DI/2014_PFEDI_Mille.Baptiste)
- [10] Geem Z.W., Kim J.H., Loganathan G.V., A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search, Simulation, 2001, 76(2), p. 60-68.
- [11] J.H. Kim, Z.W. Geem, E.S. Kim, Parameter estimation of the nonlinear Muskingum model Using harmony search, J. Am. Water Resour. Assoc. 37 (5) (2001) 1131–1138.
- [12] K.S. Lee, Z.W. Geem, A new meta-heuristic algorithm for continues engineering optimization: harmony search theory and practice, Comput. Meth. Appl. Mech. Eng. 194 (2004) 3902–3933.
- [13] A. Belmadani, L. Benasla, M. Rahli – Etude d’un Dispatching Economique Environnemental par la méthode Harmony Search, ACTA Electrotehnica, 50, N° 1: 44-48, 2009
- [14] Z.W. Geem – Music-Inspired Harmony Search Algorithm, Theory and applications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Studies in Computational Intelligence, Volume 191, ISBN 978-3-642-00184-0, 2009

- [15] Y. Wallach – Calculations and programs for power systems network, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1986.
- [16] P. Venkatesh, R. Gnanadass, P.P. Narayana – Comparaison and application of evolutionary programming techniques to combined economic emission dispatch with line flow constraints, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, n° 2: 688-697, 2003.
- [17] P. Phonrattanasak – Optimal Placement of Wind Farm on the Power System Using Multiobjective Bees Algorithm, Proceedings of the World Congress on Engineering, 2011.
- [18] R.P. Guerrero – Differential evolution based power dispatch algorithms, Thesis of Master of Science, University of Puerto Rico, Mayaguez Campus, 2004.
- [19] R. Ma, H. Yan – Multi-objective Optimal Block Transaction model based Transient Stability Evaluation, Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Applied Computer Science, Hangzhou, China, April 16-18, 2006, pp. 907-911, 2006.....
- [20] P. Venkatesh, R. Gnanadass, P.P. Narayana – Comparaison and application of evolutionary programming techniques to combined economic emission dispatch with line flow constraints, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, n° 2: 688-697, 2003.
- [21] A.Belmadani, L. Benasla, M. Rahli – Etude d'un Dispatching Economique-Environnemental par la méthode HarmonySearch, ACTA Electrotehnica, 50, N° 1: 44-48, 2009.
- [22]. A.Belmadani, L. Benasla, M. Rahli – A Fast Harmony Search Algorithm for Unimodal Optimization with application to power system Economic Dispatch, chapter16, Search Algorithms and Applications, Published by InTech, 2011, ISBN 978-953-307-1565.