

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الآلية و الألكتروتقتي  
Département d'Automatique & Électrotechnique



## Mémoire de Master

**Filière :** Électrotechnique  
**Spécialité :** Machines Electriques

Présenté par

**TOUAT Samah**

**BOUCHERIT Khaoula**

# Planification des réseaux électriques en présence d'énergie photovoltaïque

Directeur de mémoire : **Mr. BELAZZOUG Messaoud**

Année Universitaire : 2023/2024

## Remerciements

Au début et avant tout, nous sommes enfin arrivées à terminer notre travail grâce à Allah 'el hamdoulillah'.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Mr BELAZZOUG Messaoud**, nous le remercions pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire, "Merci infiniment".

Nous tenons à remercier **Dr ABID Mokhtar**, qui nous a ouvert ses portes, accepté à répondre à toutes nos questions, et nous a orientées et aidées à réaliser notre mémoire de fin d'étude.

Nous remercions les membres de jury qui nous font l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.

Nous n'oublions pas de remercier nos très chers parents qui ont fait tous leurs efforts à nous avoir guidé et inspiré durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et qui m'a soutenu durant toute ma carrière, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci à nos parents.

Enfin nous remercions nos amis et nos familles, qui étaient toujours là pour nous, leurs soutiens inconditionnels et leurs encouragements étaient d'une grande aide.

## Dédicace

Je dédie ce travail :

Tout d'abord, je remercie ALLAH, notre créateur de m'avoir donné la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste.

Je dédie ce travail à ma mère, la source de tendresse et la lumière qui guide mes routes et qui m'emmène aux chemins de la réussite, pour tous ses sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.

A mon très cher frère Abdelbassat que je le remercie énormément pour ses efforts, ses conseils, son écoute, son soutien et ses encouragements.

A toutes les personnes de ma grande famille,

A tous mes amis.

Enfin, j'offre mes bénédictions à tous ceux qui m'ont soutenu dans l'accomplissement de ce travail.

**T. Samah**

## Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

Tout d'abord, je remercie Dieu de m'avoir permis de réaliser ce modeste travail,

A mes chers parents, ma mère et mon père, mes premiers enseignants pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements,

A mes sœurs Chaimaa, Asmaa et Maria avec mes souhaits de succès dans leurs études et leur vie

A toute ma famille

A tous mes amis

Et tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce modeste travail.

**B. Khaoula**

## **Résumé :**

L'écoulement de puissance optimal (OPF) est devenu l'un des problèmes les plus importants et des sujets d'étude les plus courants pour les processus de planification des systèmes d'énergie modernes. Le problème classique de l'OPF de l'électricité est généralement formulé avec des générateurs thermiques. Avec le développement et l'augmentation de la demande d'énergie le coût total de production augmente ainsi l'émission des centrales thermiques, donc il est essentiel d'utiliser des sources d'énergie renouvelables comme l'énergie photovoltaïque (PV).

Dans ce mémoire, nous avons proposé quelques méthodes métaheuristiques pour la résolution de problème de l'OPF sur le réseau de 30 nœuds et sur le réseau de 57 nœuds sans et avec les PV. Nous avons observé que les coûts totaux sont réduits d'environ 10 % sur le réseau de 30 nœuds et de 8 % sur le réseau de 57 nœuds avec l'intégration des PV.

## **Mots clés :**

Réseaux électriques, planification, écoulement de puissance optimale, énergie solaire photovoltaïque.

## **الملخص:**

أصبحت مشكلة التدفق الأمثل للطاقة واحدة من أهم المشاكل وأكثر الموضوعات شيوعاً للدراسة في عمليات تخطيط نظام الطاقة الحديثة. وعادة ما تصاغ مشكلة التدفق الأمثل للطاقة الكهربائية الكلاسيكية للكهرباء باستخدام المولدات الحرارية. مع تطور الطلب على الطاقة وزيادة الطلب على الطاقة تزداد التكلفة الإجمالية للإنتاج، وبالتالي تزداد انبعاثات محطات الطاقة الحرارية، لذلك من الضروري استخدام مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية الكهروضوئية

في هذه الأطروحة، اقترحنا بعض الأساليب الفوقية لحل مشكلة التدفق الأمثل للطاقة على شبكة مكونة من 30 عقدة وعلى شبكة مكونة من 57 عقدة بدون الطاقة الشمسية الكهروضوئية ومعها. وقد لاحظنا أن التكاليف الإجمالية تنخفض بنحو 10% على الشبكة المكونة من 30 عقدة وبنسبة 8% على الشبكة المكونة من 57 عقدة مع دمج الطاقة الكهروضوئية.

## **الكلمات المفتاحية :**

شبكات الكهرباء، التخطيط، التدفق الأمثل للطاقة، الطاقة الشمسية الكهروضوئية .

## **Abstract:**

Optimal power flow (OPF) has become one of the most important problems and most common topics of study in modern power system planning processes. The classic OPF problem for electricity is usually formulated with thermal generators. With the development and increase in energy demand, the total cost of production is increasing, so it is essential to use renewable energy sources such as solar photovoltaic (PV).

In this dissertation, we have proposed some metaheuristic methods for solving the OPF problem on the 30-node network and on the 57-node network without and with PV. We observed that total costs are reduced by around 10% on the 30-node network and by 8% on the 57-node network with PV integration.

## **Keywords:**

Power systems, planning, optimal power flow, photovoltaic solar energy.

## Liste des abréviations :

<b>OPF</b>	Ecoulement de puissance optimale
<b>Pertes</b>	Les pertes de puissance en (MW)
<b>VD</b>	L'écart de tension en (pu)
<b>E</b>	Les émissions de combustible en (t/h)
<b>Ctax</b>	Le taxe de carbone en (\$/t)
<b>GA</b>	Algorithmes génétiques
<b>PSO</b>	Optimisation par essais particulaires
<b>ABC</b>	Colonie d'abeilles artificielles
<b>IWO</b>	Algorithme des herbes invasives
<b>GPC</b>	Construction des pyramides de Gizeh
<b>Pgt</b>	Puissance active de générateur thermique en (MW)
<b>Qgt</b>	Puissance réactive de générateur thermique en (MVars)
<b>Pgs</b>	Puissance active de générateur solaire photovoltaïque en (MW)
<b>Qgs</b>	Puissance réactive de générateur solaire photovoltaïque en (MVars)
<b>Cout gt</b>	Cout de générateur thermique en (\$/h)
<b>Cout E</b>	Cout des émissions en (\$/h)
<b>Cout gs</b>	Cout de générateur solaire photovoltaïque en (\$/h)
<b>Cout T</b>	Cout totale en (\$/h)

## Table des matières :

Introduction Générale.....	
Chapitre 01 : Généralités sur les réseaux électriques.....	
1-1 Introduction :.....	4
1-2 La planification :.....	5
1-3 Description des réseaux modernes : .....	5
1-3-1 Production d'énergie électrique :.....	6
1-3-2 Le réseau de transport et de répartition :.....	6
1-3-3 Distribution :.....	7
1-3-4 Les Charges :.....	7
1-4 Sources de production de l'électricité :.....	7
1-4-1 Les sources d'énergie non renouvelables :.....	8
1-4-2 Les sources d'énergie renouvelables :.....	8
1-5 Stabilité du réseau électrique :.....	11
1-5-1 La tension :.....	12
1-5-2 La fréquence :.....	12
1-6 Conclusion :.....	13
Chapitre 02 : Modélisation des différents éléments du réseau .....	
2-1 Introduction :.....	14
2-2 Modélisation :.....	14
2-2-1 Modèle de générateur :.....	14
2-2-2 Modèle de ligne de transmission : .....	14
2-2-3 Modèle d'un transformateur de puissance :.....	15
2-2-4 Modèle d'une charge :.....	16
2-2-5 Modèle de PV : .....	17
2-3 Ecoulement de puissance optimale :.....	20
2-4 Classification des jeux de barre : .....	20
2-4-1 Jeu de barres de charges : .....	21
2-4-2 Jeu de barres de contrôle :.....	21
2-4-3 Jeu de barre de référence ( $V\theta$ bus):.....	21



2-5 Formulation du problème d'écoulement de puissance optimal OPF:.....	22
2-6 Signification des éléments de problème de OPF : .....	22
2-6-1 Les variables d'état : .....	22
2-6-2 Les variables de contrôle : .....	23
2-6-3 Contraintes d'égalité: .....	23
2-6-4 Contraintes d'inégalités:.....	24
2-7 Cout de production des centrales thermiques : .....	24
2-8 Taxe sur les émissions et le carbone (Le coût des émissions): .....	25
2-9 Le coût des générateurs solaires PV: .....	26
2-10 Les pertes de puissance et l'écart de tension : .....	27
2-11 Conclusion : .....	28
Chapitre 03 : Méthodes d'optimisation et écoulement de puissance .....	
3-1 Introduction : .....	29
3-2 Méthodes conventionnelles d'optimisation:.....	30
3-3 Définition des Méthodes Métaheuristiques : .....	30
3-4 Algorithmes génétiques : .....	30
3-4-1 Principes de GA.....	31
3-4-2 Les AG diffèrent des autres procédures d'optimisation et de recherche de quatre façons : .....	33
3-5 Optimisation par essais particuliers .....	34
3-5-1 Principes de Optimisation par essais particuliers.....	34
3-6 Algorithme des herbes invasive : .....	36
3-6-1 Principes d'algorithme des herbes invasive : .....	36
3-6-2 Etapes d'algorithme des herbes invasive : .....	36
3-7 Algorithme de colonie d'abeilles artificielles:.....	39
3-7-1 Principes d'algorithme ABC : .....	39
3-8 Algorithme de construction des pyramides de Gizeh (GPC) : .....	41
3-8-1 Principes de GPC : .....	41
3-9 Conclusion : .....	43
Chapitre 04 : Résultats et discussion.....	
4-1 Introduction : .....	44
4-2 Présentation de logiciel MATPOWER : .....	46
4-3 Les éléments contrôlés par le MATPOWER .....	46

4-4 Résultats et interprétations :.....	46
4-4-1 Résultats et interprétations pour le réseau 30 nœuds (30 bus) : .....	47
Comparaison entre les cas de réseau 30 nœuds : .....	63
4-4-2 Résultats et interprétations pour le réseau 57 nœuds (57 bus) :.....	63
Comparaison entre les cas de réseau 57 nœuds : .....	75
4-5 Conclusion : .....	76
Conclusion Générale .....	
Références bibliographies .....	
Annexes .....	

## Liste des figures

<b>Figure 1- 1</b> : L'architecture du réseau électrique.....	6
<b>Figure1- 2</b> : production transport et distribution de l'électricité .....	8
<b>Figure 1-3</b> : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	11
<b>Figure 2-1</b> : Schéma d'une ligne de transmission en $\pi$ .....	15
<b>Figure 2-2</b> : Modèle du transformateur muni de prises réglables en charge.....	15
<b>Figure 2-3</b> : le circuit équivalent du transformateur déphaseur .....	16
<b>Figure 2-4</b> : Modélisation d'une charge.....	17
<b>Figure 2-5</b> : Schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque Modèle à une diode.....	17
<b>Figure 2-6</b> : l'irradiation solaire à l'aide PDF lognormal.....	19
<b>Figure 3-1</b> : Organigramme des algorithmes génétiques .....	32
<b>Figure 3- 2</b> : Organigramme de la méthode PSO. ....	35
<b>Figure 3-3</b> : Organigramme de la méthode iwo.....	38
<b>Figure 3-4</b> : Organigramme de la méthode ABC.....	40
<b>Figure 3-5</b> : Organigramme de la méthode GPC.....	42
<b>Figure 4-1</b> : Organigramme de l'approche proposé de la simulation de L'OPF.....	45
<b>Figure 4-2</b> :Schéma unifilaire de réseau de 30 jeux de barres .....	47
<b>Figure 4-3</b> : Meilleur cout pour GA réseau30 nœuds sans PV .....	50
<b>Figure 4-4</b> : Meilleur cout pour PSO réseau30 nœuds sans PV .....	50
<b>Figure 4-5</b> : Meilleur cout pour ABC réseau30 nœuds sans PV .....	50
<b>Figure 4-6</b> : Meilleur cout pour IWO réseau30 nœuds sans PV .....	50
<b>Figure 4-7</b> : Meilleur cout pour GPC réseau30 nœuds sans PV .....	50
<b>Figure 4-8</b> : Comparaison entre les puissances actives de réseau30 nœuds sans PV .....	51
<b>Figure 4-9</b> : Comparaison entre les puissances réactives de réseau30 nœuds sans PV.....	51
<b>Figure 4-10</b> : Comparaison entre les différents couts de réseau30 nœuds sans PV .....	51
<b>Figure 4-11</b> : tensions des nœuds de charge réseau30 nœuds sans PV.....	52
<b>Figure 4-12</b> : Meilleur cout pour GA réseau 30 nœuds avec PV.....	55
<b>Figure 4-13</b> : Meilleur cout pour PSO réseau 30 nœuds avec PV.....	55
<b>Figure 4-14</b> : Meilleur cout pour ABC réseau 30 nœuds avec PV.....	55
<b>Figure 4-15</b> : Meilleur cout pour IWO réseau 30 nœuds avec PV .....	55
<b>Figure 4-16</b> : Meilleur cout pour GPC réseau 30 nœuds avec PV.....	55
<b>Figure 4-17</b> : Comparaison entre les puissances actives de réseau 30 nœuds avec PV.....	56
<b>Figure 4-18</b> : Comparaison entre les puissances réactives de réseau 30 nœuds avec PV .....	56
<b>Figure 4-19</b> : Comparaison entre les différents couts de réseau 30 nœuds avec PV .....	56
<b>Figure 4-20</b> : tensions des nœuds de charge réseau 30 nœuds avec PV .....	57
<b>Figure 4-21</b> : Meilleur cout pour GA réseau 30 nœuds avec 2 PV.....	60
<b>Figure 4-22</b> : Meilleur cout pour PSO réseau 30 nœuds avec 2 PV .....	60
<b>Figure 4-23</b> : Meilleur cout pour ABC réseau 30 nœuds avec 2 PV .....	60
<b>Figure 4-24</b> : Meilleur cout pour IWO réseau 30 nœuds avec 2 PV .....	60
<b>Figure 4-25</b> : Meilleur cout pour GPC réseau 30 nœuds avec 2 PV.....	60

<b>Figure 4-26:</b> Comparaison entre les puissances actives de réseau 30 nœuds avec 2 PV.....	61
<b>Figure 4-27:</b> Comparaison entre les puissances réactives de réseau 30 nœuds avec 2 PV .....	61
<b>Figure 4-28:</b> Comparaison entre les différents couts de réseau 30 nœuds avec 2 PV .....	61
<b>Figure 4-29:</b> tensions des nœuds de charge réseau 30 nœuds avec 2 PV .....	62
<b>Figure 4-30 :</b> Schéma unifilaire de réseau de 57 jeux de barres.....	64
<b>Figure 4-31:</b> Meilleur cout pour GA réseau 57 nœuds sans PV .....	67
<b>Figure 4-32:</b> Meilleur cout pour PSO réseau 57 nœuds sans PV .....	67
<b>Figure 4-33:</b> Meilleur cout pour ABC réseau 57 nœuds sans PV .....	67
<b>Figure 4-34:</b> Meilleur cout pour IWO réseau 57 nœuds sans PV.....	67
<b>Figure 4-35:</b> Meilleur cout pour GPC réseau 57 nœuds sans PV .....	67
<b>Figure 4-36:</b> Comparaison entre les puissances actives de réseau 57 nœuds sans PV .....	68
<b>Figure 4-37:</b> Comparaison entre les puissances réactives de réseau 57 nœuds sans PV.....	68
<b>Figure 4-38:</b> Comparaison entre les différents couts de réseau 57 nœuds sans PV .....	68
<b>Figure 4-39:</b> tensions des nœuds de charge réseau 57 nœuds sans PV.....	69
<b>Figure 4-40:</b> Meilleur cout pour GA réseau 57 nœuds avec 2 PV.....	72
<b>Figure 4-41:</b> Meilleur cout pour PSO réseau 57 nœuds avec 2 PV .....	72
<b>Figure 4-42:</b> Meilleur cout pour ABC réseau 57 nœuds avec 2 PV .....	72
<b>Figure 4-43:</b> Meilleur cout pour IWO réseau 57 nœuds avec 2 PV .....	72
<b>Figure 4-44:</b> Meilleur cout pour GPC réseau 57 nœuds avec 2 PV.....	72
<b>Figure 4-45:</b> Comparaison entre les puissances actives de réseau 57 nœuds avec 2 PV .....	73
<b>Figure 4-46 :</b> Comparaison entre les puissances réactives de réseau 57 nœuds avec 2 PV.....	73
<b>Figure 4-47:</b> Comparaison entre les différents couts de réseau 57 nœuds avec 2 PV .....	73
<b>Figure 4-48:</b> tensions des nœuds de charge réseau 57 nœuds avec 2 PV.....	74

## Liste des tableaux

<b>Tableau 2-1</b> : les types des variables des Jeux de barre .....	21
<b>Tableau 4-1</b> : solution de l'OPF pour le réseau 30 nœuds sans intégration de générateur PV .....	48
<b>Tableau 4-2</b> : solution de l'OPF pour le réseau 30 nœuds avec intégration d'un PV .....	53
<b>Tableau 4-3</b> : solution de l'OPF pour le réseau 30 nœuds avec intégration de 2 PV .....	58
<b>Tableau 4-4</b> : solution de l'OPF pour le réseau 57 nœuds sans intégration de générateur PV.....	65
<b>Tableau 4-5</b> : solution de l'OPF pour le réseau 30 nœuds avec intégration de 2 PV .....	71

# **Introduction Générale**

Les réseaux électriques sont considérés comme les systèmes artificiels les plus complexes, principalement en raison de leur vaste couverture géographique, des diverses transactions entre les différents services publics et de la diversité des aménagements, de la taille et des équipements utilisés par les différentes compagnies d'électricité. Les ingénieurs ont besoin d'outils spéciaux pour analyser, surveiller et contrôler de manière optimale les différents aspects d'un système aussi sophistiqué. Certains de ces outils sont la répartition économique, l'engagement des unités, l'estimation de l'état, le contrôle automatique de la production et le flux de puissance optimal (OPF). Ce dernier est considéré comme l'outil de base qui a fait l'objet de recherches approfondies depuis sa première introduction par Carpentier en 1962 [1].

L'objectif de l'OPF est de trouver les réglages optimaux d'un réseau électrique donné qui optimisent une certaine fonction objective tout en satisfaisant les équations de flux de puissance, la sécurité du système et les limites de fonctionnement des équipements. Différentes variables de contrôle, dont certaines sont les sorties de puissance réelle et les tensions des générateurs, les réglages de changement de prise des transformateurs, les déphaseurs, les condensateurs commutés et les réacteurs, sont manipulées pour obtenir un réglage optimal du réseau en fonction de la formulation du problème. L'une des principales difficultés du problème OPF réside dans la nature des variables de contrôle, certaines d'entre elles étant continues (sorties de puissance réelle et tensions) et d'autres discrètes (réglage des prises des transformateurs, déphaseurs et injections réactives). L'objectif le plus couramment utilisé est la minimisation de la fonction de coût global du combustible. Cependant, d'autres objectifs traditionnels sont la minimisation de la perte de puissance active, la déviation de la tension du bus, l'émission des unités de production, le nombre d'actions de contrôle et le délestage de charge. La déréglementation du secteur de l'énergie électrique a également introduit de nouveaux objectifs au problème OPF, tels que la maximisation du bien-être social et du profit de chaque fournisseur [2] [3].

Les ressources énergétiques non renouvelables dans le monde sont sévèrement limitées, et la crise énergétique est devenue le défi le plus crucial pour l'humanité à l'époque actuelle. L'utilisation d'énergies alternatives, telles que les énergies renouvelables, peut permettre de

surmonter cette crise. En outre, les effets destructeurs des énergies non renouvelables, en particulier des combustibles fossiles, sur l'environnement ont accru l'importance du développement des technologies énergétiques.

Il semble que l'énergie solaire soit l'une des meilleures alternatives aux sources renouvelables en raison de sa nature illimitée et non polluante. La quantité d'énergie provenant de la lumière du soleil qui atteint la terre en une heure est équivalente à l'énergie utilisée par l'homme en un an. Cette forme d'énergie peut être convertie en énergie électrique grâce à l'énergie solaire photovoltaïque (PV) et à l'énergie solaire concentrée (CSP). L'énergie photovoltaïque convertit directement la lumière du soleil en électricité [4].

Dans les premières phases des questions liées à l'OPF, les chercheurs ont été engagés dans le seul but d'obtenir le coût du combustible le plus bas en utilisant des générateurs thermiques. Cependant, un nombre croissant de sources d'énergie renouvelables doit être intégré dans les réseaux électriques actuels au fil du temps, et ce pour plusieurs raisons, notamment la nécessité d'une taxe sur le carbone, l'épuisement des ressources fossiles, les réglementations environnementales et l'augmentation de la consommation d'énergie [5].

En ce qui concerne les émissions, les générateurs thermiques alimentés par des combustibles fossiles émettent des gaz nocifs dans l'environnement, alors que les sources renouvelables n'en émettent pas. La taxe carbone est imposée dans certains pays en proportion des gaz à effet de serre émis. Dans les études de cas sélectionnées, le montant de la taxe carbone est associé à la fonction objective afin d'étudier l'effet sur la programmation des générateurs [6].

Plusieurs algorithmes métaheuristiques ont été développés pour résoudre les problèmes d'optimisation de l'écoulement de puissance (OPF) dans les réseaux électriques. Ces méthodes d'optimisation visent à trouver des solutions approchées à des problèmes complexes d'OPF en utilisant des techniques inspirées de la nature.

Notre objectif dans ce mémoire est d'utiliser les méthodes d'optimisation pour résoudre le problème de la planification de réseau électrique en présence de l'énergie solaire photovoltaïque.



**Ce mémoire sera composé de quatre chapitres :**

Dans le premier, nous avons donné quelques définitions et introduire quelques notions de base.

Dans le deuxième chapitre, nous avons modélisé les composantes du réseau électrique et les panneaux photovoltaïques, et on présente la formulation du problème d'écoulement de puissance optimal OPF.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les méthodes métaheuristiques et leurs principes.

Le dernier chapitre, nous présentons et analysons les résultats obtenus après implémentation des algorithmes sur les réseaux de 30 bus et 57 bus.

Et nous finirons par une conclusion générale.

# **Chapitre 01 :**

# **Généralités sur les**

# **réseaux électriques**

## **1-1 Introduction :**

L'OPF est un problème d'optimisation visant à déterminer la contribution de chaque centrale électrique en service afin de répondre à la demande des consommateurs d'électricité de sorte que le coût de production de l'énergie totale soit le plus faible possible en respectant les différentes contraintes du réseau. Ce problème est mathématiquement complexe en raison du nombre important de variables et de contraintes qu'il implique. L'étude de l'optimisation de l'écoulement de puissance (OPF) peut nécessiter la connaissance du transit des puissances dans un réseau électrique ainsi que des tensions aux différents points remarquables du réseau (générateurs, transformateurs, charges). Ces grandeurs sont essentielles pour la gestion des réseaux et pour déterminer l'évolution du réseau en cas de changements de configurations, tels que l'ajout de nouveaux générateurs (énergies renouvelables), l'augmentation de la demande d'énergie, et l'installation de nouvelles lignes [7].

La planification des systèmes électriques est une des composantes de la planification du développement énergétique et économique. Elle vise donc à déterminer la stratégie la moins coûteuse qui permette de développer à long terme les systèmes de production, de transport et de distribution pour que ceux-ci répondent à la demande prévue tout en respectant un certain nombre de conditions techniques, économiques et politiques. La planification des systèmes électriques a toujours porté essentiellement sur l'expansion de la production [8].

Au tournant du millénaire, l'utilisation des énergies renouvelables notamment celle basée sur l'énergie solaire photovoltaïque a connu une véritable croissance. Poussé par les objectifs climatiques et des avantages économiques, de nombreux pays à travers le monde ont intensifié leurs efforts et leurs ambitions dans ce domaine.

Le développement technologique a permis d'accroître l'efficacité des modules photovoltaïques qui est une source durable et verte. En outre, l'engagement mondial en faveur de cette technologie a permis de réduire considérablement les coûts grâce à des économies d'échelle, tant sur le marché des services publics que sur celui des toitures commerciales et résidentielles.

## **1-2 La planification :**

La planification consiste à optimiser la répartition des puissances actives et réactives requises entre les centrales interconnectées dans un réseau électrique, dans le but de réduire les coûts au minimum.

Dans les domaines de l'exploitation et de la planification des réseaux électriques, il est nécessaire de résoudre des problèmes d'OPF qui visent à minimiser une fonction dépendant des variables  $P$ ,  $Q$ ,  $V$  et  $\theta$ , tout en respectant des contraintes d'égalité et d'inégalité reflétant les limites opérationnelles des équipements tels que les unités de production, les lignes et les transformateurs. Pour établir une répartition économique de la charge entre les générateurs interconnectés, il est crucial d'exprimer le coût de fonctionnement de ces centrales en fonction de la puissance produite [7].

La solution du problème d'OPF commence par l'identification des variables connues et inconnues dans le système qui dépendent du type de jeu de barres.

L'objectif de la planification est :

- minimiser les coûts de production.
- minimiser les pertes en puissance actives.
- Améliorer la stabilité des tensions.

## **1-3 Description des réseaux modernes :**

Le réseau électrique peut être subdivisé en quatre parties essentielles :

- ❖ La production d'énergie électrique
- ❖ Le transport et la répartition
- ❖ La distribution
- ❖ Les charges

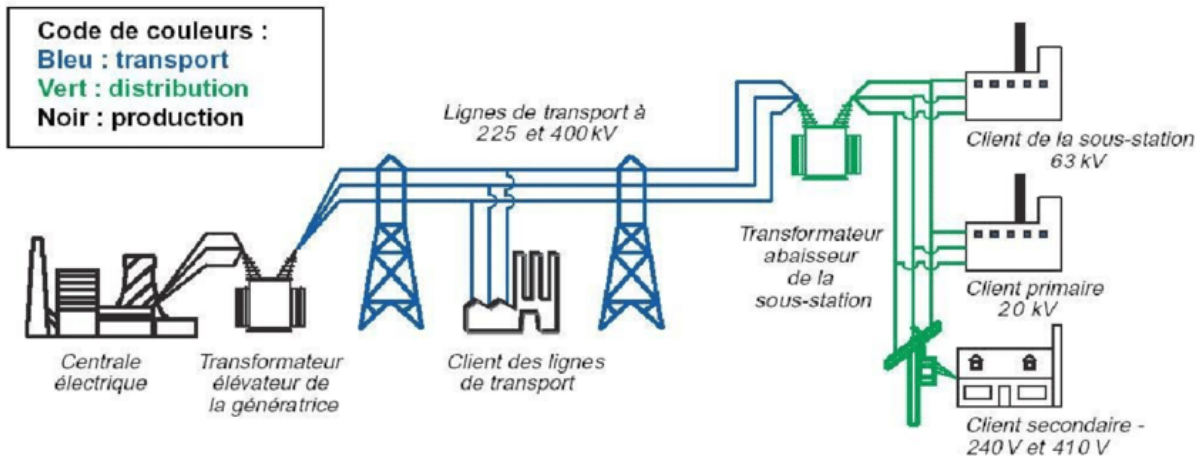


Figure 1- 1 : L'architecture du réseau électrique

### 1-3-1 Production d'énergie électrique :

Le développement industriel et technologique a contribué à une consommation sans cesse croissante d'énergie électrique ce qui implique une multiplication des unités de production, des moyens de transport et distribution, et une complexification des réseaux électriques. Le rôle des producteurs d'énergie électrique, est donc d'assurer en tout temps et en tout lieu la production de la puissance active permettant de résorber cette demande sans cesse croissante avec un coût de combustible aussi faible que possible. L'objectif du dispatching économique est d'optimiser la production électrique afin de maintenir des coûts bas, en répartissant efficacement les capacités de production entre les différentes unités. De plus, le réchauffement climatique et l'accroissement des mouvements de protection de l'environnement contraint les producteurs à réduire les émissions des gaz produites par la combustion des énergies fossiles dans les différentes centrales [9].

La minimisation des coûts de production d'énergie électrique est devenue une priorité dans la planification des réseaux électriques. Pour atteindre cet objectif, diverses méthodes mathématiques ont été développées afin de réduire au minimum le coût en combustible nécessaire à la production d'électricité.

### 1-3-2 Le réseau de transport et de répartition :

Leur fonction est principalement le transport de l'énergie électrique sur grandes distances. Pour réduire les pertes, ces réseaux sont à haute et très haute tension (de 63 kV à 450 kV). Pour des

raisons de sécurité du fonctionnement, les réseaux de transport ont une structure maillée. Cela est fait aussi pour éviter une congestion forte sur une seule branche du réseau [10].

Les réseaux de répartition ou réseaux Haute Tension ont pour rôle de répartir, au niveau régional, l'énergie issue du réseau de transport. Leur tension est supérieure à 63 kV selon les régions. Ces réseaux sont, en grande part, constitués de lignes aériennes, dont chacune peut transiter plus de 60 MVA sur des distances de quelques dizaines de kilomètres. Leur structure est, soit en boucle fermée, soit le plus souvent en boucle ouverte, mais peut aussi se terminer en antenne au niveau de certains postes de transformation. En zone urbaine dense, ces réseaux peuvent être souterrains sur des longueurs n'excédant pas quelques kilomètres [11].

### **1-3-3 Distribution :**

Les réseaux de distribution représentent le dernier maillon de la chaîne d'acheminement de l'énergie entre les centres de production et les consommateurs finaux. Ils sont en général plus vastes et plus denses que les réseaux de transport et de répartition qui les alimentent à travers les postes de transformation haute tension de niveau B (supérieur à 50 kV) vers la haute tension de niveau A (comprise entre 1 et 50 kV) [12].

### **1-3-4 Les Charges :**

Les charges sont à caractère industriel commercial et résidentiel. Si de très grandes charges industrielles peuvent être directement alimentées par le réseau de transport, les petites charges le sont par le réseau primaire de distribution [11].

## **1-4 Sources de production de l'électricité :**

L'électricité peut être générée de diverses manières, en utilisant une gamme variée de sources d'énergie. On peut produire de l'énergie électrique à partir de centrales thermiques conventionnelles, qui utilisent des combustibles fossiles ou l'énergie nucléaire, ainsi que des centrales hydroélectriques. De plus, il existe des alternatives telles que les éoliennes, les panneaux solaires photovoltaïques, les piles à combustible, les centrales à biomasse, les centrales géothermiques, et bien d'autres encore [13].

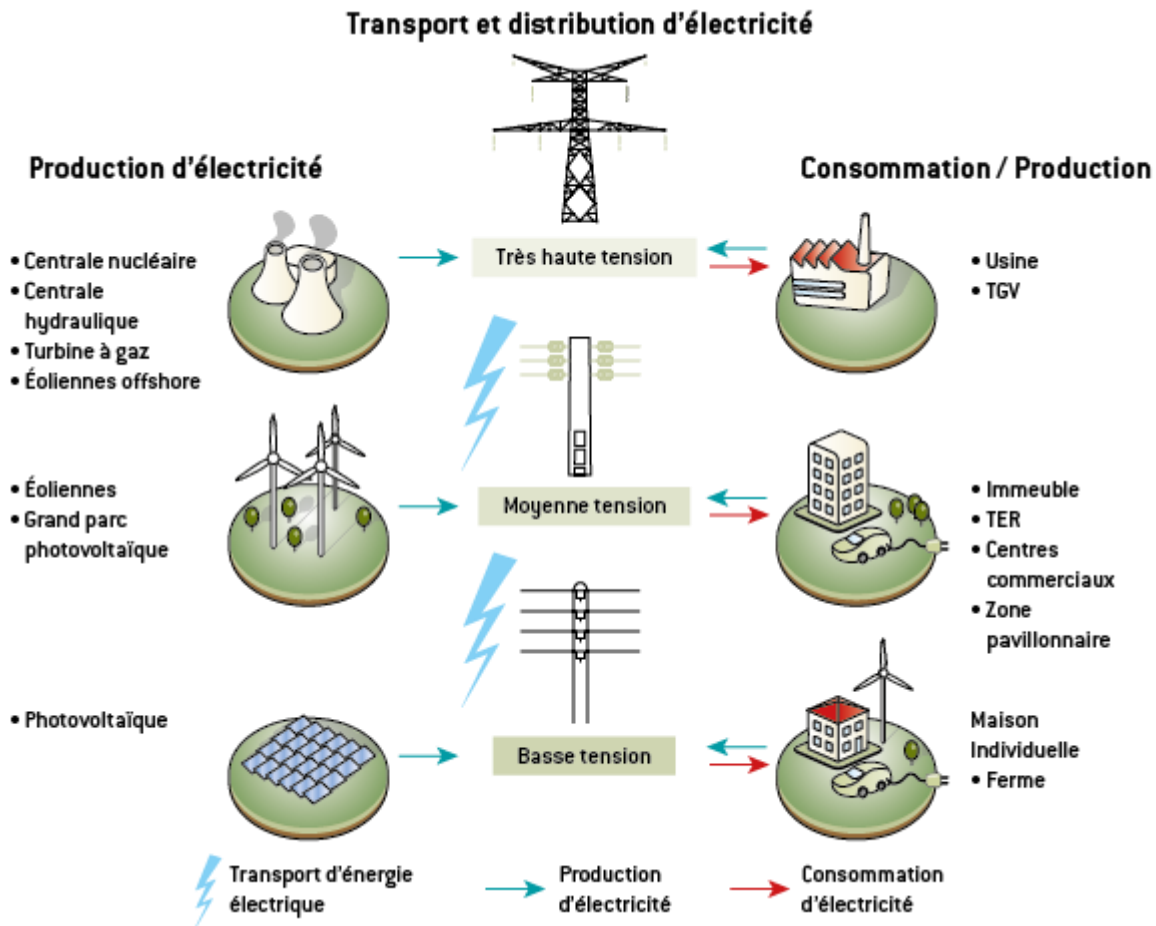


Figure1- 2: production transport et distribution de l'électricité

### 1-4-1 Les sources d'énergie non renouvelables :

#### a. L'énergie fossile :

L'énergie fossile est générée en brûlant des combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole, le gaz naturel, etc. Cette combustion produit de la chaleur, qui est ensuite convertie en énergie mécanique en faisant tourner une turbine [14].

#### b. L'énergie fissile :

L'énergie nucléaire est issue de l'utilisation d'un combustible fissile, comme l'uranium, présent dans le sous-sol terrestre. Ce combustible est utilisé pour produire de l'électricité en exploitant la chaleur résultant de la fission des atomes d'uranium.

### 1-4-2 Les sources d'énergie renouvelables :

Les énergies renouvelables sont des formes d'énergie qui proviennent de sources inépuisables

et se renouvellent continuellement, préservant ainsi leur disponibilité future. Ces ressources sont issues de phénomènes naturels tels que le rayonnement solaire et l'énergie géothermique, principalement générés par le soleil et la chaleur terrestre. Elles offrent une alternative prometteuse aux sources d'énergie classiques, non renouvelables comme les combustibles fossiles [15].

Il y a cinq sources essentielles d'énergies dites renouvelables : le vent (éoliennes), l'eau (barrages hydroélectriques, marée-motrice), les végétaux (biocarburants), la chaleur du sol (géothermie) et le soleil (panneaux solaires).

**a. Energie éolienne :**

L'énergie éolienne exploite la force du vent. Les éoliennes sont des dispositifs conçus pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en énergie électrique.

**b. Source hydraulique gravitaire :**

Les turbines des centrales hydroélectriques sont actionnées par la force de l'eau qui s'écoule d'un niveau supérieur à un niveau inférieur, créant ainsi une pression qui fait tourner les turbines. La puissance électrique produite dépend de la hauteur de la chute d'eau (la différence de niveau) et du débit de l'eau. Plus la hauteur de chute et le débit sont élevés, plus la quantité d'électricité générée sera importante [16].

**c. La biomasse (carburant renouvelable) :**

Certaines centrales thermiques à flamme utilisent comme source primaire des combustibles issus de la biomasse (bois, biogaz, paille, déchets organiques, etc.) ou de déchets industriels et domestiques.

**d. La géothermie :**

La géothermie est une technique qui exploite la chaleur naturelle présente dans la croûte terrestre pour produire de la chaleur ou de l'électricité.

**e. L'énergie solaire :**

L'énergie solaire, ressource la plus abondante sur Terre, est la principale source des énergies renouvelables, bien que son intensité puisse varier. Ce rayonnement solaire peut être exploité de deux manières principales : directement, grâce aux cellules photovoltaïques pour produire de l'électricité, ou indirectement, par la chaleur solaire thermique utilisée pour le chauffage ou



pour la production d'électricité [17].

- **L'énergie solaire thermique :**

Les centrales solaires thermiques sont des installations qui utilisent des turbines à vapeur pour produire de l'électricité. Cela est réalisé en chauffant de l'eau à l'aide d'un fluide caloporteur.

- **L'énergie solaire PHOTOVOLTAÏQUE :**

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est produite par la conversion directe de l'énergie des photons, contenus dans le rayonnement lumineux (qu'il provienne du soleil ou d'autres sources), en énergie électrique. Pour cela, elle utilise des modules photovoltaïques qui comportent des cellules ou des photopiles fabriquées avec des matériaux sensibles aux longueurs d'onde du spectre visible, permettant ainsi cette transformation d'énergie. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension  $I(V)$  non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [17].

**Principe d'une cellule photovoltaïque :**

le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque dont la structure générale est celle d'une diode à jonction PN fortement dopée. La diode est constituée d'une région de type N, où la conduction se fait principalement par des électrons, et d'une région de type P où la conduction électrique se fait principalement par les trous chargés positivement. Dès que la diode est éclairée et que la température dépasse 100 K, ses atomes dopés sont tous ionisés et cèdent un électron mobile ou un trou mobile. Lorsque la diode est exposée à la lumière et que la température dépasse 100 K, ses atomes dopés deviennent tous ionisés, libérant ainsi des électrons mobiles ou des trous mobiles. Si la cellule photovoltaïque est connectée à un circuit externe, elle agit comme une source d'énergie électrique, et la puissance fournie dépend de l'intensité lumineuse qu'elle reçoit. Plusieurs technologies de cellules photovoltaïques sont disponibles, en fonction des matériaux utilisés pour constituer la jonction [18].

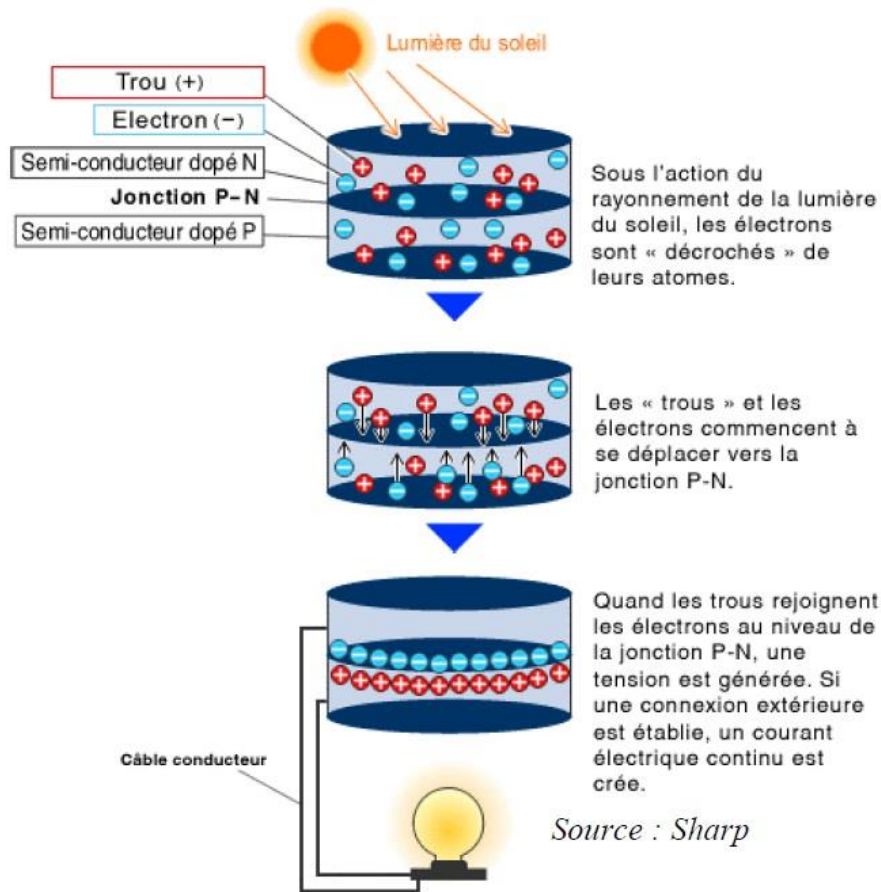


Figure 1-3: principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

## 1-5 Stabilité du réseau électrique :

La tension et la fréquence sont des éléments cruciaux pour assurer la fiabilité, la stabilité et le bon fonctionnement du système électrique. En effet, du point de vue des consommateurs, les machines rotatives et autres appareils sont conçus pour opérer avec des valeurs fixes de tension et de fréquence. Du point de vue des gestionnaires de réseau, maintenir une tension et une fréquence constantes garantit une qualité de service optimale et une continuité accrue [19].

En cas de déséquilibre, on observe principalement deux phénomènes :

- Une consommation supérieure à la production : le risque de délestage
- Une production supérieure à la consommation : le risque de blackout

### **1-5-1 La tension :**

La stabilité en tension se réfère généralement à une situation dans un système énergétique où l'équilibre de la puissance réactive ne peut être maintenu, entraînant une baisse de tension dans le système [19].

#### **a. Le réglage primaire de tension (RPT) :**

Le réglage primaire intervient localement avec une constante de temps d'environ 100 ms sur la tension des générateurs pour répondre aux variations rapides induites par les fluctuations de la demande de puissance réactive. Il permet ainsi, dans les limites des réserves primaires des générateurs, de maintenir l'équilibre local entre la production et la consommation de puissance réactive, tout en réagissant aux changements aléatoires de la tension [20].

#### **b. Le réglage secondaire de tension (RST) :**

Le réglage secondaire est automatisé et centralisé par régions dites zones de réglage, ces zones de réglages doivent être indépendantes du point de vue de la tension. Cela signifie que chaque zone est en théorie insensible à toute variation de tension pouvant survenir dans une zone voisine. Il a pour objet de limiter les transits de puissance réactive sur les lignes d'interconnexion, et de maintenir la tension en certains nœuds représentatifs de la tension de chaque zone à sa valeur de consigne. Ces nœuds spécifiques sont appelés nœuds pilotes [20].

#### **c. Le réglage tertiaire de tension (RTT) :**

Le réglage tertiaire, manuel, effectué par le dispatching national, consiste à réévaluer, à intervalles de quinze minutes, les consignes de tension des nœuds pilotes de chaque zone de réglage selon des critères technico-économiques et coordonner le plan de tension entre les différentes zones de réglage secondaire, pour exploiter le réseau en assurant au mieux sa sûreté [21].

### **1-5-2 La fréquence :**

Le contrôle de la puissance active générée par les groupes de production est lié au réglage de la fréquence du réseau électrique.

### **a. Le réglage primaire de la fréquence :**

Le réglage primaire de fréquence permet d'ajuster rapidement (en quelques secondes) la production d'électricité en fonction de la demande. Étant donné que la fréquence est un paramètre global pour l'ensemble du système électrique, tout changement dans la demande de puissance active se traduit par une variation de la fréquence. Les régulateurs de vitesse peuvent compenser le déficit ou l'excédent de puissance active mais en déplaçant la fréquence de sa valeur de consigne. Le réglage primaire de fréquence est généralement requis pour toutes les unités de production connectées au réseau de transport [22].

### **b. Le réglage secondaire de la fréquence :**

Ce réglage automatique intervient plus lentement que le réglage primaire, s'activant généralement une dizaine de secondes après que la fréquence a été stabilisée par le réglage primaire. Son objectif principal est de ramener la fréquence à sa valeur de référence et de rétablir les échanges entre les différentes zones du réseau électrique [23].

### **c. Le réglage tertiaire de la fréquence :**

Ce processus ne relève plus d'une régulation automatique, mais plutôt d'un ajustement du plan de production dans les quelques dizaines de minutes suivant un déséquilibre significatif [24].

## **1-6 Conclusion :**

Nous avons traité dans ce chapitre en générale le réseau électrique concernant la description des réseaux modernes (la production, le transport et la répartition, la distribution et la consommation), ainsi que les Sources de production de l'électricité (Les sources d'énergie renouvelables et non renouvelables), aussi analyse de stabilité du réseau électrique réglage des tensions et réglage du fréquence.

Et pour le deuxième chapitre, on s'intéressera à la modélisation des générateurs thermiques et renouvelables.

# **Chapitre 02 :**

## **Modélisation des différents éléments du réseau**

## **2-1 Introduction :**

Le réseau électrique englobe tous les éléments nécessaires pour acheminer l'énergie électrique du générateur vers le consommateur. Le système électrique traditionnel se compose de trois éléments principaux : la production d'électricité, le transport et la distribution. Ce système inclut une variété d'équipements tels que des transformateurs, des lignes de transmission, des générateurs, des moteurs, ainsi que des dispositifs de mesure et de contrôle.

Pour étudier un réseau électrique complexe, on établit des modèles ou des représentations simplifiées de ses composants principaux tels que les générateurs, les différents types de transformateurs, les lignes et les charges.

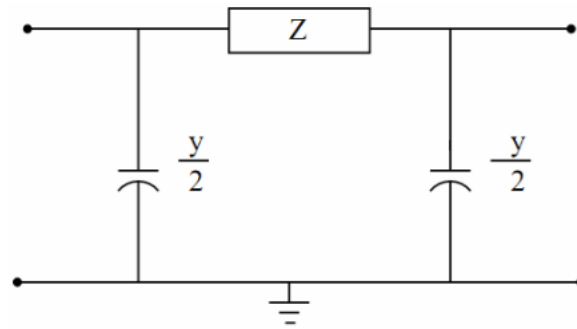
## **2-2 Modélisation :**

### **2-2-1 Modèle de générateur :**

Dans l'analyse du flux de puissance, les générateurs sont modélisés comme des sources d'injection de courant. En régime stationnaire, un générateur est habituellement contrôlé de manière à maintenir constante la puissance active injectée au nœud du réseau et la tension à ses bornes. La puissance active fournie par le générateur est ajustée via le contrôle de la turbine, qui doit rester dans les limites de capacité du système turbine-générateur. La tension est principalement influencée par l'injection de puissance réactive au nœud de production, et comme le générateur doit fonctionner dans les limites de sa capacité réactive, il n'est pas possible de régler la tension en dehors de certaines limites acceptables [25].

### **2-2-2 Modèle de ligne de transmission :**

Une courte ligne de transmission est représentée par son impédance en série. Les moyennes et longues lignes sont représentées par un circuit  $\pi$ , figure (2-1). La résistance de la ligne de transmission est souvent négligée car elle est petite par rapport à sa réactance [26].



**Figure 2-1:** Schéma d'une ligne de transmission en  $\pi$

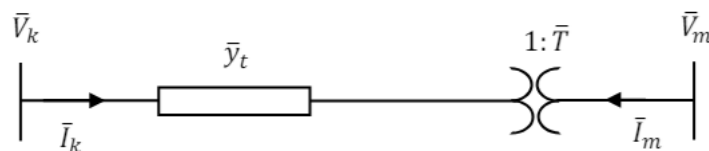
La résistance  $r$  et la réactance  $x$  définissent ce que l'on appelle l'impédance complexe  $z$  du modèle en  $\pi$ :  $z = r+jx$ . L'admittance en série  $y$  est l'inverse de l'impédance complexe :  $y = \frac{1}{z}$

La matrice d'admittance  $Y$  est définie de la façon suivante :

$$Y = \begin{pmatrix} 1 + \frac{YZ}{2} & Z \\ Y + \frac{Y^2 Z}{4} & 1 + \frac{YZ}{2} \end{pmatrix} \quad (2-1)$$

### 2-2-3 Modèle d'un transformateur de puissance :

En général, les transformateurs de puissance haute tension sont munis de prises réglables en charge afin de maintenir un niveau de tension acceptable et d'assurer la régulation de la puissance active et réactive transitant sur les lignes de transports. Ce type de transformateur est généralement représenté par une admittance branchée en série avec un transformateur idéal d'un rapport de transformation complexe [25].



**Figure 2-2:** Modèle du transformateur muni de prises réglables en charge

Les équations des tensions nodales du transformateur peuvent être écrites sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \overline{I_k} \\ \overline{I_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{y_t} & -\overline{y_t}/\overline{T} \\ -\overline{y_t}/\overline{T} & -\overline{y_t}/\overline{T}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{V_k} \\ \overline{V_m} \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

- $\overline{Y_t}$  : l'admittance du transformateur
- $\overline{T} \cong T e^{i\phi t}$  : le rapport de transformation complexe.
- $\phi t$  : l'angle de déphasage introduit par le transformateur entre les jeux de barres k et m.

La Figure (2-3) présente le circuit équivalent du transformateur en phase

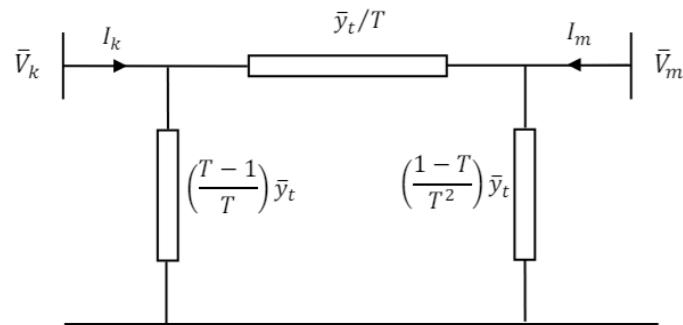


Figure 2-3: le circuit équivalent du transformateur déphaseur

#### 2-2-4 Modèle d'une charge :

Les charges représentent les consommateurs de l'énergie électrique ; lesquels consommateurs peuvent aller de l'élémentaire à l'équivalent complexe très diversifié. En règle générale, une charge peut être modélisée par : Une caractéristique statique complexe ; puissance complexe dépendante de la tension [27] :

$$S(U) = P(U) + j Q(U) \quad (2-3)$$

La charge est donnée par une puissance complexe constante, indépendante de la tension du nœud auquel elle est branchée :

$$S_{Li} = P_{Li} + j Q_{Li} \quad (2-4)$$

La Figure (2-4) présente le modèle de la charge :



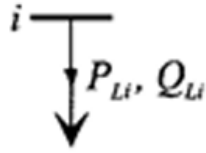


Figure 2-4: Modélisation d'une charge

## 2-2-5 Modèle de PV :

### a. Modèle de la cellule photovoltaïque :

L'utilisation des circuits équivalents est convenable pour simuler les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.

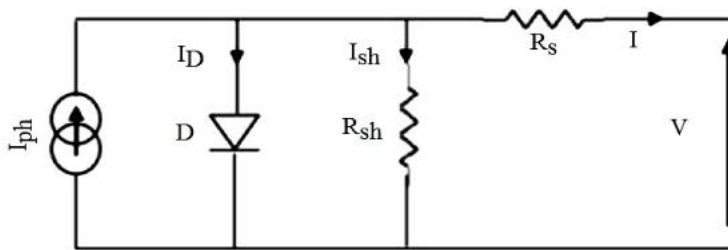


Figure 2-5: Schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque Modèle à une diode

Ce modèle consiste en un générateur de courant  $I_{ph}$  monté en parallèle avec une diode, une résistance série  $R_s$  et une résistance parallèle (résistance shunt)  $R_{sh}$ . Il est représenté par le circuit équivalent de la figure (2-5). Ce circuit peut être utilisé pour une seule cellule, de même que pour un module constitué de plusieurs cellules ou pour un champ constitué de plusieurs modules. Le courant généré par un module photovoltaïque constitué de  $N_s$  cellules en série, en fonction de la tension  $V$  aux bornes est donné par la relation [28] :

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left( \frac{V + R_s I}{n V_t} - 1 \right) \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (2-5)$$

$V_t$  est la tension thermique du module pour un nombre  $N_s$  de cellules en série et définie par :

$$V_t = \frac{N_s K T}{q} \quad (2-6)$$

- $I_{ph}$  : Photo-courant du module ;
- $I_0$  : Courant de saturation inverse de la diode ;
- $n$  : Facteur d'idéalité de la jonction ( $1 \leq n \leq 5$ );
- $q$  : Charge de l'électron;
- $k$  : Constante de Boltzmann;
- $T$  : Température des cellules

Les paramètres du modèle sont : la résistance série  $R_s$  , la résistance shunt  $R_{sh}$  , le photo-courant  $I_{ph}$  , le courant de saturation inverse de la diode  $I_0$  et le facteur d'idéalité de la diode  $n$ .

### **Paramètres électriques de la cellule photovoltaïque :** [29]

- **Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  (pour  $V_{oc} = 0$ ) :**

Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  : c'est le courant maximal généré par la cellule lorsqu'elle est soumise à un court-circuit  $V = 0$  pour un éclairage " plein soleil ".

- **La tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  (pour  $I_{cc} = 0$ ) :**

La tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  : c'est la tension aux bornes de la cellule sans charge où le courant généré  $I = 0$ . En négligeant le courant qui passe dans la résistance parallèle  $R_{sh}$ , le  $V_{oc}$ , s'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule.

- **La courbe courant-tension :**

La caractéristique I-V est la caractéristique essentielle de la cellule solaire qui répondra à toutes les charges possibles sous un ensemble particulier des conditions d'ensoleillement et de température.

- **La courbe puissance-tension :**

La courbe de la puissance est capable de donner la valeur de puissance maximale à des conditions d'ensoleillement et de température bien définie.

### b. Modèle de rayonnement solaire (lognormal) :

Le rayonnement solaire est généralement modélisé à l'aide d'une distribution lognormal, La distribution lognormale prend en compte le rayonnement solaire moyen, l'écart-type de la distribution normale sous-jacente (s) et la moyenne de la distribution normale sous-jacente (m). En analysant les données historiques sur le rayonnement solaire, les paramètres de la distribution lognormal peuvent être stimulés et la fonction de distribution de probabilité (PDF) peut être générée [30].

Ce PDF permet d'évaluer la production d'énergie et les performances d'une unité solaire photovoltaïque dans une zone donnée.

La conversion de l'irradiation solaire en énergie pour la centrale photovoltaïque peut également être donnée par la formule suivante :

$$P_{Sr} (G) = \begin{cases} P_{Sr} \frac{G^2}{G_{std} * R_c} & \text{for } 0 \leq G \leq R_c \\ P_{Sr} \frac{G^2}{G_{std}} & \text{for } G \geq R_c \end{cases} \quad (2-7)$$

- $G_{std}$  : Représente l'irradiation solaire dans des conditions environnementales normales.
- $R_c$  : un point d'irradiation spécifique
- $P_{Sr}$  : la puissance totale de la centrale photovoltaïque (PV).

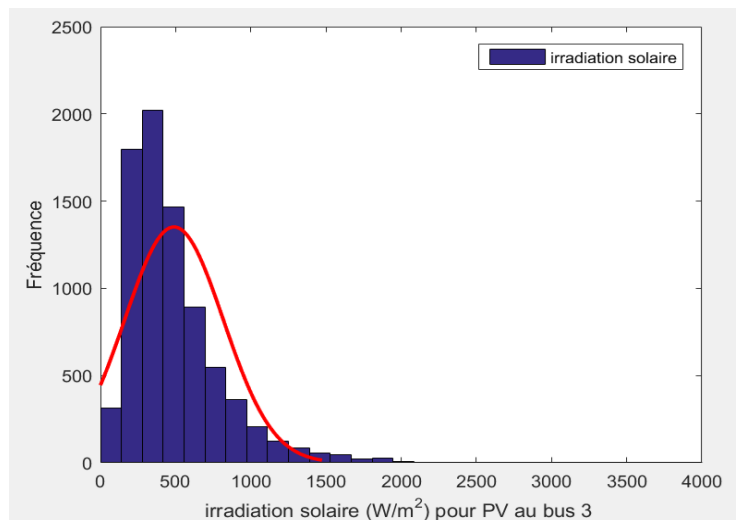


Figure 2-6: l'irradiation solaire à l'aide PDF lognormal

### **c. La différence entre les deux modèles :**

Le Modèle de la cellule photovoltaïque est capable de donner les paramètres (puissance ...) à des conditions d'ensoleillement et de température constants.

Mais le modèle à l'aide d'une distribution lognormal est capable de donner les paramètres pour des conditions d'ensoleillement variable (en fonction de l'ensoleillement).

### **2-3 Ecoulement de puissance optimal :**

Le problème de l'optimisation de l'Écoulement de Puissance (OPF) consiste à trouver la puissance optimale d'énergie à produire pour répondre à la demande électrique de la manière la plus économique possible, tout en respectant les contraintes du réseau électrique [31].

L'écoulement de puissance optimale est une étude en régime permanent du réseau électrique qui permet d'obtenir, à chaque barre, l'amplitude et la phase de la tension ( $V, \theta$ ) ainsi que les puissances actives et réactives injectées ( $P, Q$ ). Connaissant les tensions et les puissances injectées, nous pouvons calculer, les courants et les puissances dans les lignes et ceux fournis par les sources. Généralement, les jeux de barres d'un réseau électrique sont classés en trois catégories : Jeu de barres de référence, Jeu de barres de charge ( $PQ$ ) et Jeu de barres de génération ( $PV$ ) [32].

L'écoulement de puissance optimale permet à résoudre des problèmes d'optimisation consistant à minimiser une fonction des variables  $P, Q, V$ , et  $\theta$  avec des contraintes d'égalité et d'inégalité qui traduisent les limites de fonctionnement des ouvrages (groupes de production, lignes, transformateurs, ...etc.)

### **2-4 Classification des jeux de barre :**

Les jeux de barres sont catégorisés en fonction de deux variables parmi les quatre suivantes :  $P, Q, V$  et  $\theta$ . Ils sont généralement classés en trois types :

### 2-4-1 Jeu de barres de charges :

Appelés aussi les jeux de barres ( $P, Q$ ) Pour ce type de jeux de barre, on associe généralement les charges. Ces dernières sont caractérisées par la consommation des puissances active et réactive. Les variables à déterminer sont le module et la phase de la tension [33].

### 2-4-2 Jeu de barres de contrôle :

Pour ce type de jeux de barre, on associe les centrales de production. On spécifie la puissance active et le module de la tension. Les variables à déterminer sont la phase de la tension et la puissance réactive [33].

### 2-4-3 Jeu de barre de référence ( $V\theta$ bus) :

On l'appelle aussi le jeu de barres balancier ou slack bus, c'est un élément fictif crée pour l'étude de la répartition de la puissance, il a pour rôle de fournir la puissance supplémentaire nécessaire pour compenser les pertes de transmission, car celles-ci ne sont pas connues d'avance. D'une façon générale et par convention ce jeu de barres est identifié par le jeu de barres  $N^{\circ} = 1$  connecté à une source de tension d'où le module  $V$  et la phase  $\theta$  de la tension sont connues, (généralement  $|V| = 1 p u$  et  $\theta = 0^{\circ}$ ). Les puissances active ( $P$ ) et réactive ( $Q$ ) sont donc inconnues et doivent être calculées après avoir résoudre le problème de l'écoulement de puissance [33].

Le tableau suivant résume tous les types des variables des Jeux de barre existent :

Type de Jeu de barres	Variables connues	Variables inconnues
Jeu de barres de charges (PQ bus)	$P, Q$	$V, \theta$
Jeu de barres de contrôle (PV bus)	$P, V$	$Q, \theta$
Jeu de barre de référence ( $V\theta$ bus)	$V, \theta$	$P, Q$

Tableau 2-1 : les types des variables des Jeux de barre

## 2-5 Formulation du problème d'écoulement de puissance optimal OPF:

Le but de l'OPF est d'optimiser un certain objectif soumis à plusieurs contraintes d'égalité et d'inégalité. Le problème peut être modélisé mathématiquement comme suit [1] :

$$\min f(x, u) \quad (2-8)$$

$$g(x, u) = 0 \quad (2-9)$$

$$h(x) \leq 0 \quad (2-10)$$

$$U_{\min} \leq U \leq U_{\max} \quad (2-11)$$

Avec :

- $X$  : Vecteur des variables d'état.
- $U$  : Vecteur des variables à contrôler.
- $\min f(x, u)$  : représente la fonction objective.
- $g(x, u)$  : représente les contraintes d'égalités.
- $h(x)$  : représente les contraintes d'inégalités.
- $U_{\min} \leq U \leq U_{\max}$  : représente les limites des variables de contrôle.

## 2-6 Signification des éléments de problème de OPF :

### 2-6-1 Les variables d'état :

Il s'agit de l'ensemble des variables qui décrivent tout état unique du système. Les variables d'état pour la formulation du problème OPF sont les suivantes [34] :

$$X = [ P_{G1} ; V_{L1} \dots V_{LNL} ; Q_{G1} \dots Q_{GNG} ; \delta_1 \dots \delta_{NL} ] \quad (2-12)$$

- $P_{G1}$ : La puissance active générée par le jeu de barre de référence (slack bus).
- $V_{Li}$ : Les modules des tensions des jeux de barres charges (load).
- $Q_{Gi}$  : Puissance réactive générée de générateur  $i$ .  $i=1, \dots, NG$ .
- $\delta_i$  : L'angle des tensions.

- $N_L$  et  $n_l$  : sont respectivement le nombre de bus de charge et le nombre de lignes de transmission.

### 2-6-2 Les variables de contrôle :

Il s'agit de l'ensemble des variables qui peuvent être ajustées pour satisfaire les équations de flux de charge. L'ensemble des variables de contrôle dans la formulation du problème OPF sont [34] :

$$U = [ P_{G2} \dots P_{GNG} ; V_{G1} \dots V_{GNG} ] \quad (2-13)$$

- $P_G$  : la Puissance active générée de générateur  $i$ .  $i=2, \dots, NG$
- $V_G$  : la tension générée de générateur  $i$ .
- $NG$  : sont le nombre de générateurs

### 2-6-3 Contraintes d'égalité :

Les contraintes d'égalité sont les équations d'équilibre de puissance dans lesquelles la puissance active et réactive générée dans le réseau doit être égale à la demande et aux pertes dans le réseau [35].

$$P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{m=1}^n V_m [G_{im} \cos(\delta_i - \delta_m) + B_{im} \sin(\delta_i - \delta_m)] = 0 \quad (2-14)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{m=1}^n V_m [G_{im} \sin(\delta_i - \delta_m) - B_{im} \cos(\delta_i - \delta_m)] = 0 \quad (2-15)$$

Avec :

- $P_{Gi}$  : Puissance active générée au nœud  $i$ .
- $P_{Di}$  : Puissance active demandée au nœud  $i$ .
- $Q_{Gi}$  : Puissance réactive générée au nœud  $i$ .
- $Q_{Di}$  : Puissance réactive demande au nœud  $i$ .
- $V_i, V_m$  : Valeurs des tensions  $ith$  et  $mth$ .
- $n$  : Le nombre total de la buse.
- $G_{im}$  : La conductance de la ligne.
- $B_{im}$  : La susceptance de la ligne connecté entre  $ith$  et  $mth$  buses.

- $\delta_{im}$ : La différence des phases des  $i^{th}$  et  $m^{th}$  buses.

#### 2-6-4 Contraintes d'inégalités :

Ensemble de contraintes qui reflètent les limites opérationnelles et physiques du système, données comme suit [34] :

##### a. Contraintes des générateurs :

Pour tous les générateurs : la tension, les puissances actives et réactives doivent être limitées par leurs valeurs inférieures et supérieures comme suit :

$$V_{Gi min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi max} \quad i=1 \dots, NG \quad (2-16)$$

$$P_{Gi min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi max} \quad i=1 \dots, NG \quad (2-17)$$

$$Q_{Gi min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi max} \quad i=1 \dots, NG \quad (2-18)$$

##### b. Contraintes de sécurité :

Ces contraintes peuvent être formulées mathématiquement comme suit :

$$V_{i min} \leq V_i \leq V_{i max} \quad i=1 \dots, NL \quad (2-19)$$

$$S_{li} \leq S_{li max} \quad i=1 \dots, NL \quad (2-20)$$

#### 2-7 Cout de production des centrales thermiques :

Les centrales thermiques ont besoin de combustibles fossiles pour fonctionner. L'association entre le coût du combustible (\$/h) et la puissance produite (MW) est approximativement donnée par la relation comme suit [35] :

$$C_t(P_{tgi}) = \sum_{i=1}^{Ng} C_i(P_{tgi}) = \sum_{i=1}^{Ng} (a_i + b_i P_{tgi} + c_i P_{tgi}^2) \quad (2-21)$$

- $C_t$  : Représente le coût total de production.
- $C_i(P_{tgi})$  : Représente le coût de production de l' $i$ -Ng générateur
- $P_{tgi}$  : c'est la puissance active produite par l' $i$ -Ng générateur.
- $Ng$  : unités de production



- a, b, c : sont les coefficients de la fonction coût

## 2-8 Taxe sur les émissions et le carbone (Le coût des émissions) :

Les centrales thermiques à base de combustibles fossiles sont considérées comme un acteur majeur de la crise de la pollution à laquelle nous sommes confrontés aujourd'hui. La croissance industrielle a entraîné une augmentation de la demande de production d'électricité [1].

L'objectif du problème de répartition des émissions de combustibles est de minimiser les émissions totales de toutes les unités thermiques en attribuant des paramètres de contrôle optimaux tout en satisfaisant à diverses contraintes d'exploitation du réseau [1].

Les émissions de combustible d'un certain nombre d'unités de production peuvent être modélisées mathématiquement comme suit-en (t/h) [1] :

$$E = \sum_{i=1}^{Ng} [(\alpha_i + \beta_i P_{tgi} + \gamma_i P_{tgi}^2) \times 0.01 + \omega_i \exp(\mu_i P_{tgi})] \quad (2-22)$$

- $\alpha, \beta, \gamma, \omega, \mu$  : sont les coefficients d'émission liés au i - ième générateur

Ces dernières années, pour lutter contre le réchauffement climatique, de nombreux pays ont exercé une pression importante sur l'ensemble du secteur de l'énergie afin de réduire les émissions de carbone une taxe carbone. La taxe carbone est imposée sur les gaz à effet de serre émis [30].

Le coût des émissions est calculé en multipliant le taux de la taxe carbone  $C_{tax}$  par les émissions (E) en \$/h [3].

Cette mesure encourage les investissements dans des sources d'énergie plus propres, comme l'énergie éolienne et solaire, et réduit l'impact environnemental des émissions [30].

Le coût des émissions est représenté comme suit :

$$E_m = C_{tax} \times E \quad (2-23)$$

## 2-9 Le coût des générateurs solaires PV :

En raison de l'absence de besoins en combustible dans les générateurs solaires, l'évaluation des fonctions de coût pour ces sources suit certaines normes, et différents types de coûts sont associés à leur fonctionnement. Il s'agit des coûts directs, des coûts de réserve et des coûts de pénalité [30].

**A) Coûts directs :** Ces coûts englobent divers éléments tels que l'équipement, l'installation, la maintenance et les frais d'exploitation [30].

$$D_{\text{cout}}_{S,K} (SP_{SC,K}) = h_K * SP_{SC,K} \quad (2-24)$$

- $h_K$  : les coefficients du coût direct associé à la k ème unité d'énergie solaire.
- $SP_{SC,K}$  : représentent la puissance programmée des centrales solaires.

**B) Coûts de réserve :**

Lorsque la puissance réelle fournie par le générateur solaire est inférieure aux valeurs estimées. Cette situation est appelée surestimation de la puissance. Dans ce cas, l'opérateur du système doit utiliser les ressources de la réserve tournante pour assurer une alimentation électrique continue et ininterrompue aux consommateurs. Le coût de réserve est exprimé par les équations suivantes [30] :

$$\begin{aligned} R_{\text{cout}}_{RS,K} (SP_{SC,K} - SP_{AV,K}) &= RK_{S,K} (SP_{SC,K} - SP_{AV,K}) \\ &= RK_{S,K} * f_S (SP_{AV,K} < SP_{SC,K}) * [SP_{SC,K} - E (SP_{AV,K} < SP_{SC,K})] \quad (2-25) \end{aligned}$$

- $SP_{AV,K}$  : La puissance réelle disponible de la même centrale solaire photovoltaïque.
- $RK_{S,K}$  : correspond au coût de réserve spécifiquement attribué au kème générateur solaire.
- $f_S (SP_{AV,K} < SP_{SC,K})$  : est la probabilité d'une pénurie d'énergie solaire par rapport à la puissance programmée.
- $E (SP_{AV,K} < SP_{SC,K})$  : est l'anticipation de la puissance solaire PV en dessous de la puissance programmée

### C) Coûts de pénalité :

Lorsque la puissance réelle produite par la centrale solaire est supérieure à celle initialement estimée, ce qui entraîne un surplus d'énergie. Le coût de la pénalité est exprimé par les équations suivantes [30]:

$$\begin{aligned} PC_{S,K} (SP_{A,K} - SP_{sc,K}) &= PK_{S,K} (SP_{AV,K} - SP_{sc,K}) \\ &= PK_{S,K} * f_S (SP_{AV,K} > SP_{sc,K}) * [E (SP_{AV,K} > SP_{sc,K}) - SP_{sc,K}] \end{aligned} \quad (2-26)$$

- $PK_{S,K}$  : est le coefficient de coût de pénalité associé à la kème installation solaire photovoltaïque.
- $f_S (SP_{AV,K} > SP_{sc,K})$ : Désigne la probabilité d'un surplus d'énergie solaire, c'est-à-dire que la puissance réelle dépasse la puissance programmée  $SP_{sc,K}$ .
- $E (SP_{AV,K} > SP_{sc,K})$ : Signifie que l'on s'attend à ce que l'énergie solaire dépasse la puissance programmée  $SP_{sc,K}$ .

## 2-10 Les pertes de puissance et l'écart de tension :

Dans le problème de l'écoulement optimal de la puissance (OPF), des paramètres supplémentaires du système tels que la perte de puissance dans le réseau, les lignes de transmission et la déviation de la tension jouent un rôle important [30].

Pour calculer la perte de réseau, l'équation suivante est couramment utilisée [30] :

$$\text{Pertes} = \sum_{q=1}^{nl} [Gq(ij) V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (2-27)$$

- $nl$  : est le nombre total de lignes de transmission.
- $Gq(ij)$  : est la conductance de la branche i-j.
- $V_i$  et  $V_j$  : sont les tensions aux bus i et j respectivement.
- $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ : est la différence d'angle de tension entre eux.

L'écart de tension est un paramètre utilisé pour évaluer la qualité de la tension dans un réseau. Il représente la différence cumulée entre les tensions de tous les bus de charge (bus PQ) et la valeur nominale de 1 par unité (p.u.).

L'écart de tension est exprimé par l'équation suivante :

$$VD = \sum_{p=1}^{Nl} |V_{Lp} - 1| \quad (2-28)$$

## **2-11 Conclusion :**

Dans ce chapitre on a établi les modèles des composants principaux de réseau électrique : Modélisation de générateur, ligne, Transformateur, charge et du PV. Après on a étudié le problème de l'Écoulement de Puissance optimale (OPF) avec Classification des jeux de barre, les variables d'état et les variables de contrôle, Contraintes d'égalité et Contraintes d'inégalités ainsi que le coût de production des générateurs thermiques, le coût des émissions (carbone) et le coût des générateurs solaires PV.

Pour le deuxième chapitre, on a utilisé des méthodes d'optimisation Métaheuristiques pour résoudre le problème de l'Écoulement de Puissance optimale (OPF).

# **Chapitre 03 :**

## **Méthodes**

### **d'optimisation et**

#### **écoulement de**

##### **puissance**

### **3-1 Introduction :**

Les solutions d'écoulement optimal de la puissance (OPF) sont des outils cruciaux dans l'exploitation des réseaux électriques. Il s'agit d'un flux de puissance astucieux qui utilise des algorithmes d'optimisation pour réguler de manière optimale les paramètres de contrôle du réseau électrique en tenant compte de diverses contraintes. De nombreux algorithmes d'optimisation classiques ont été utilisés pour traiter le problème OPF, comme la programmation non linéaire, l'algorithme de Newton-Raphson et Gauss-Seidel, la programmation et les algorithmes de décomposition. Bien que ces méthodes permettent d'obtenir une solution globalement optimale dans certains cas, elles présentent certaines lacunes, comme l'incapacité à traiter des fonctions d'objectif non différentiables et une grande sensibilité aux points de recherche initiaux. En outre, ces algorithmes ne peuvent pas garantir une solution globale. Il est donc nécessaire de proposer des méthodes alternatives pour remédier aux inconvénients susmentionnés [36].

Le développement significatif des ordinateurs au cours des dernières années a entraîné une tendance à la résolution des problèmes OPF à l'aide de techniques d'optimisation inspirées de la nature. Plusieurs techniques d'optimisation stochastique ont été proposées et utilisées pour traiter les problèmes d'OPF, comme les algorithmes génétiques (GA), l'optimisation par essaim de particules (PSO), l'algorithme de colonie d'abeilles artificielle (ABC), l'algorithme de recherche gravitationnelle (GSA)...

Ces algorithmes sont plus efficaces pour découvrir des solutions globales à différents problèmes OPF non linéaires et ne sont pas empêtrés dans des optima locaux. Cet avantage est obtenu grâce à l'évaluation rapide et simultanée de nombreux points de l'espace de solution. Leur universalité et la simplicité de leur mise en œuvre les rendent adaptées aux problèmes d'optimisation à grande échelle. Ces méthodes peuvent également traiter des variables entières et discrètes. Malheureusement, quels que soient leurs avantages, chacun de ces algorithmes d'optimisation basés sur la population nécessite un réglage approprié des paramètres de contrôle spécifiques à l'algorithme, car un mauvais réglage de ces paramètres augmente la

charge de calcul (c'est-à-dire qu'il affecte la propriété de convergence) ou conduit à une solution sous-optimale [36].

### **3-2 Méthodes conventionnelles d'optimisation :**

Les approches traditionnelles utilisées pour résoudre le problème de l'Optimal Power Flow (OPF) peuvent être regroupées en deux catégories distinctes. La première catégorie concerne les méthodes d'optimisation non linéaire telles que la méthode du gradient et les méthodes de Newton. La seconde catégorie englobe les méthodes de programmation linéaire, qui reposent sur les principes du simplexe et du point intérieur.

### **3-3 Définition des Méthodes Métaheuristiques :**

Les métaheuristiques représentent un ensemble d'algorithmes d'optimisation utilisés pour résoudre des problèmes complexes. Elles s'inspirent souvent de systèmes naturels, qu'ils soient issus de la physique (comme le recuit simulé), de la biologie de l'évolution (comme les algorithmes génétiques), ou encore de l'éthologie (comme l'optimisation par essaims particulaires) [37].

Les algorithmes métaheuristiques permettent de s'approcher d'une ou de plusieurs solutions à des problèmes dits "difficiles" qui s'apparentent à des problèmes d'optimisations. Le principe d'une métaheuristique est de minimiser ou de maximiser une fonction objective. L'avantage des métaheuristiques est de trouver un minimum global à un problème de minimisation et de ne pas rester bloqué sur un minimum local [37].

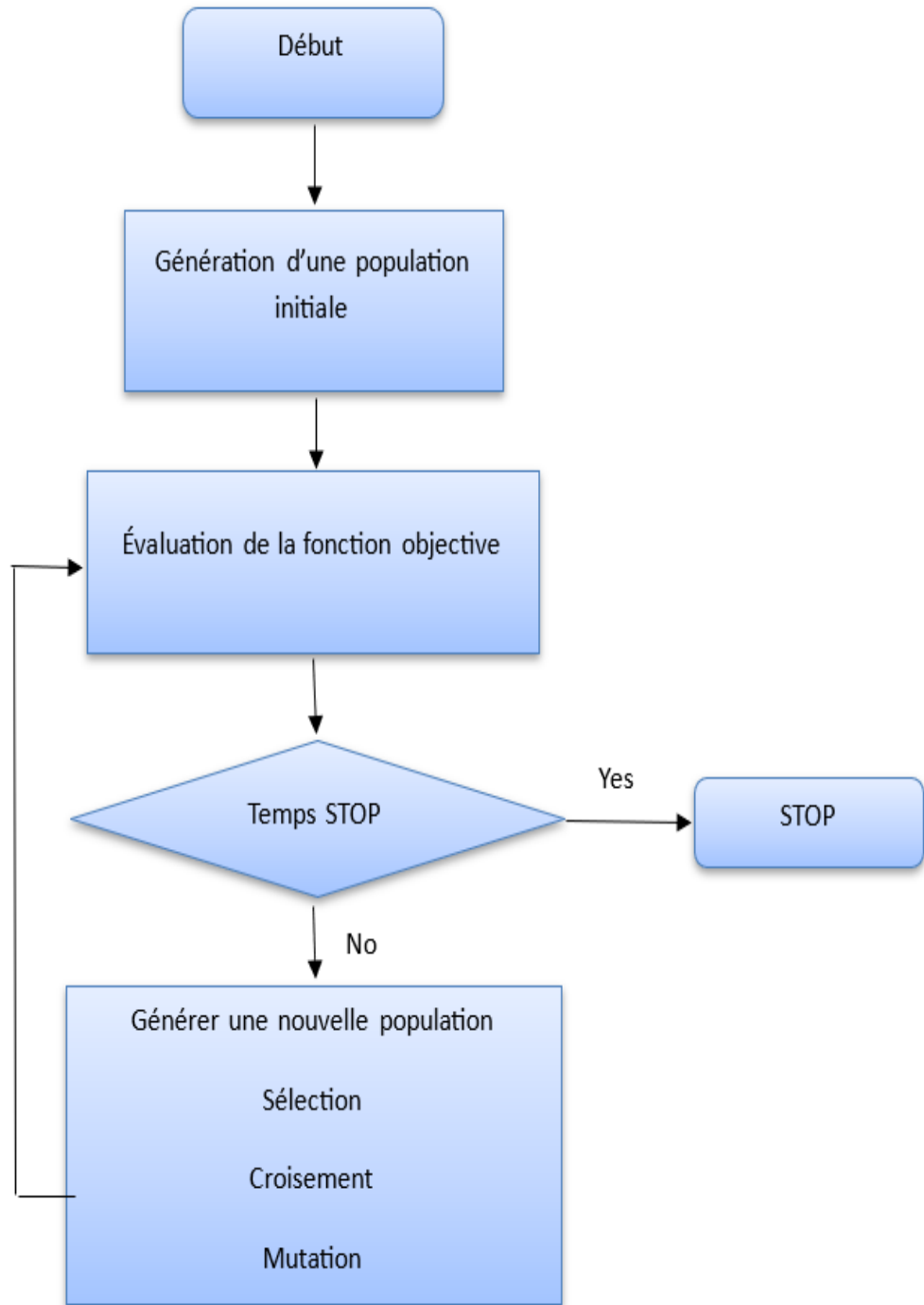
### **3-4 Algorithmes génétiques :**

L'AG, inventé par Holland au début des années 1970, est une méthode de recherche globale stochastique qui imite la métaphore de l'évaluation biologique naturelle. Les AG opèrent sur une population de solutions candidates codées sur une chaîne de bits finie appelée chromosome. Afin d'obtenir l'optimalité, chaque chromosome échange des informations en utilisant des opérateurs empruntés à la génétique naturelle pour produire la meilleure solution [38].

### **3-4-1 Principes de GA**

L'idée principale de l'AG est d'imiter la sélection naturelle et la survie du plus apte. Dans l'AG, les solutions sont représentées par des chromosomes. Les chromosomes sont évalués en fonction de leur valeur d'aptitude et sont classés du meilleur au pire sur la base de cette valeur d'aptitude. Le processus de production de nouvelles solutions dans l'AG imite la sélection naturelle des organismes vivants, et ce processus est réalisé par l'application répétée de trois opérateurs génétiques : la sélection, le croisement et la mutation [39].





**Figure 3-1 :** Organigramme des algorithmes génétiques

La génération suivante est créée à partir de la génération actuelle d'une manière biologiquement inspirée qui consiste en trois étapes [40] :

**Sélection** : nous évaluons l'aptitude des membres de la génération actuelle, puis nous sélectionnons le sous-ensemble présentant les meilleures valeurs d'aptitude pour servir de parents à la génération suivante. En bref, la survie des plus aptes.

**Croisement** : est une technique utilisée pour simuler la reproduction d'individus afin de créer de nouveaux individus.

**Mutation** : En biologie, la mutation se produit avec une faible probabilité lorsqu'un enfant peut avoir une caractéristique qui n'a pas été héritée des parents. De même, dans les algorithmes génétiques, l'étape de mutation perturbe la solution de la descendance avec une très faible probabilité (par exemple, en retournant un bit de la représentation de la chaîne de bits de la solution).

### **3-4-2 Les AG diffèrent des autres procédures d'optimisation et de recherche de quatre façons :**

1- Les AG travaillent avec un codage de l'ensemble des paramètres, et non avec les paramètres eux-mêmes. Ils peuvent donc facilement traiter les variables entières ou discrètes.

2- Les AG effectuent des recherches à partir d'une population de points, et non d'un seul point. Ils peuvent donc fournir des solutions globalement optimales.

3- Les AG n'utilisent que les informations relatives à la fonction objective, et non les dérivés ou d'autres connaissances auxiliaires. Ils peuvent donc traiter les fonctions non lisses, non continues et non différentiables qui existent réellement dans un problème d'optimisation pratique.

4- Les AG utilisent des règles de transition probabilistes, et non des règles déterministes. [38]

### **3-5 Optimisation par essais particuliers**

PSO est un type d'algorithme d'optimisation heuristique. Il est motivé par la simulation de certains comportements sociaux simulés d'animaux, tels que l'accostage des oiseaux, et a été proposé pour la première fois par Kennedy et Eberhart en 1995. Comme l'AG, il s'agit d'une méthode itérative basée sur la population. Les particules sont décrites par leurs deux propriétés instinctives : la position et la vitesse. La position de chaque particule représente un point dans l'espace des paramètres, qui est une solution possible du problème d'optimisation, et la vitesse est utilisée pour modifier la position [41].

#### **3-5-1 Principes de Optimisation par essais particuliers**

Dans l'PSO, une solution est représentée par une particule et la population de solutions est appelée essaim. la population de solutions est appelée un essaim de particules. Chaque particule possède deux propriétés principales : la position et la vitesse. Chaque particule se déplace vers une nouvelle position en utilisant la vitesse. Lorsqu'une nouvelle position est atteinte, la meilleure position de chaque particule et la meilleure position de l'essaim sont mises à jour si nécessaire. La vitesse de chaque particule est ensuite ajustée en fonction de l'expérience de la particule. Le processus est répété jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit rempli [39].

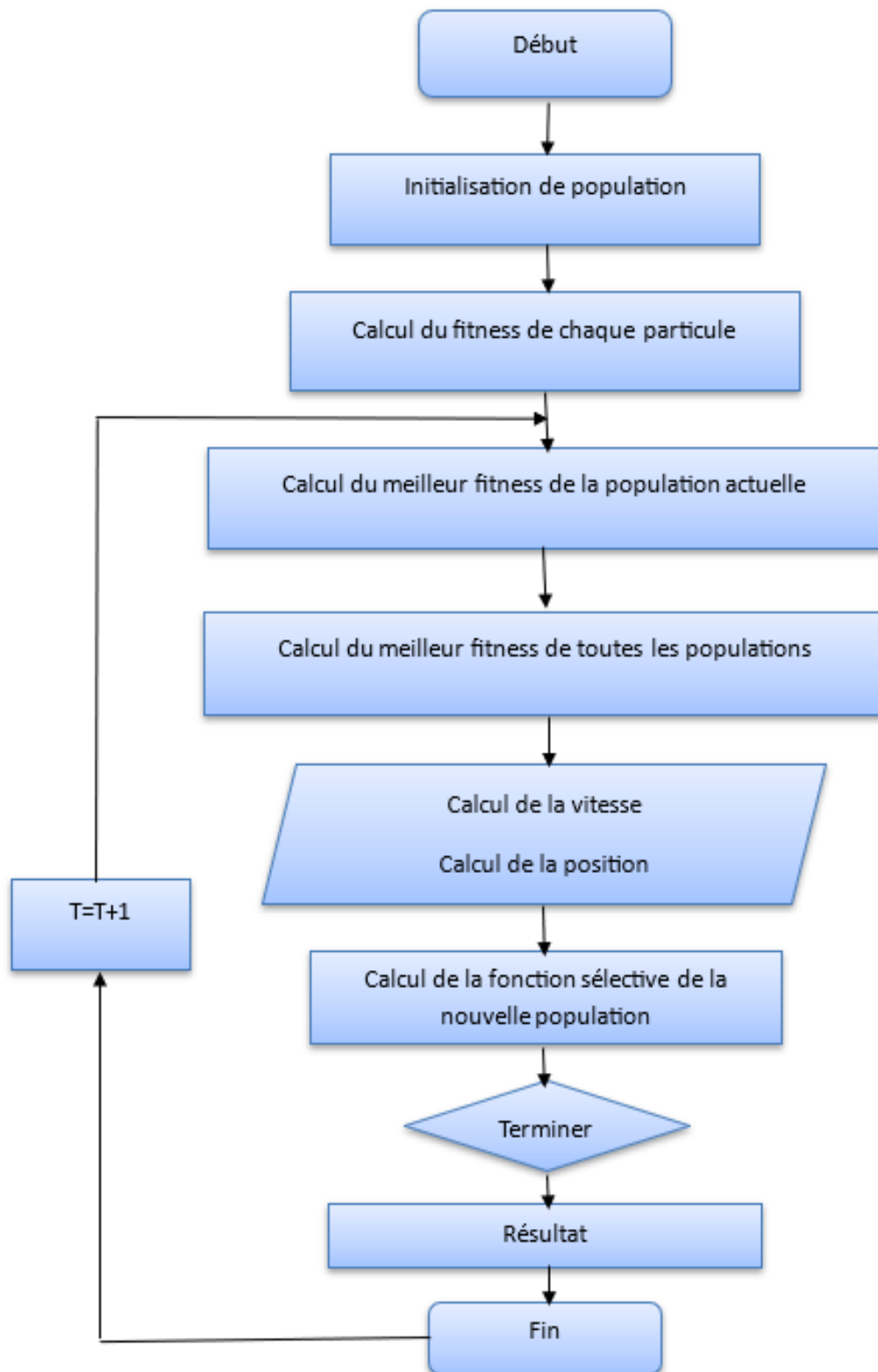


Figure 3- 2 : Organigramme de la méthode PSO.

### **3-6 Algorithme des herbes invasives :**

Invasive Weed Optimisation (IWO) est un algorithme d'optimisation métaheuristique inspiré de la nature qui s'inspire du comportement des plantes envahissantes qui se disputent les ressources dans leur nouvel environnement. Les habitudes de croissance des mauvaises herbes sont puissantes et constituent souvent une menace importante pour les cultures. Leur capacité à se développer dans diverses conditions environnementales leur confère une grande adaptabilité. C'est pourquoi les chercheurs ont tenté d'élaborer un algorithme d'optimisation puissant en imitant ces caractéristiques. L'algorithme vise à imiter la résistance, l'adaptabilité et la nature aléatoire des communautés de mauvaises herbes dans un échantillon donné [42].

#### **3-6-1 Principes d'algorithme des herbes invasives :**

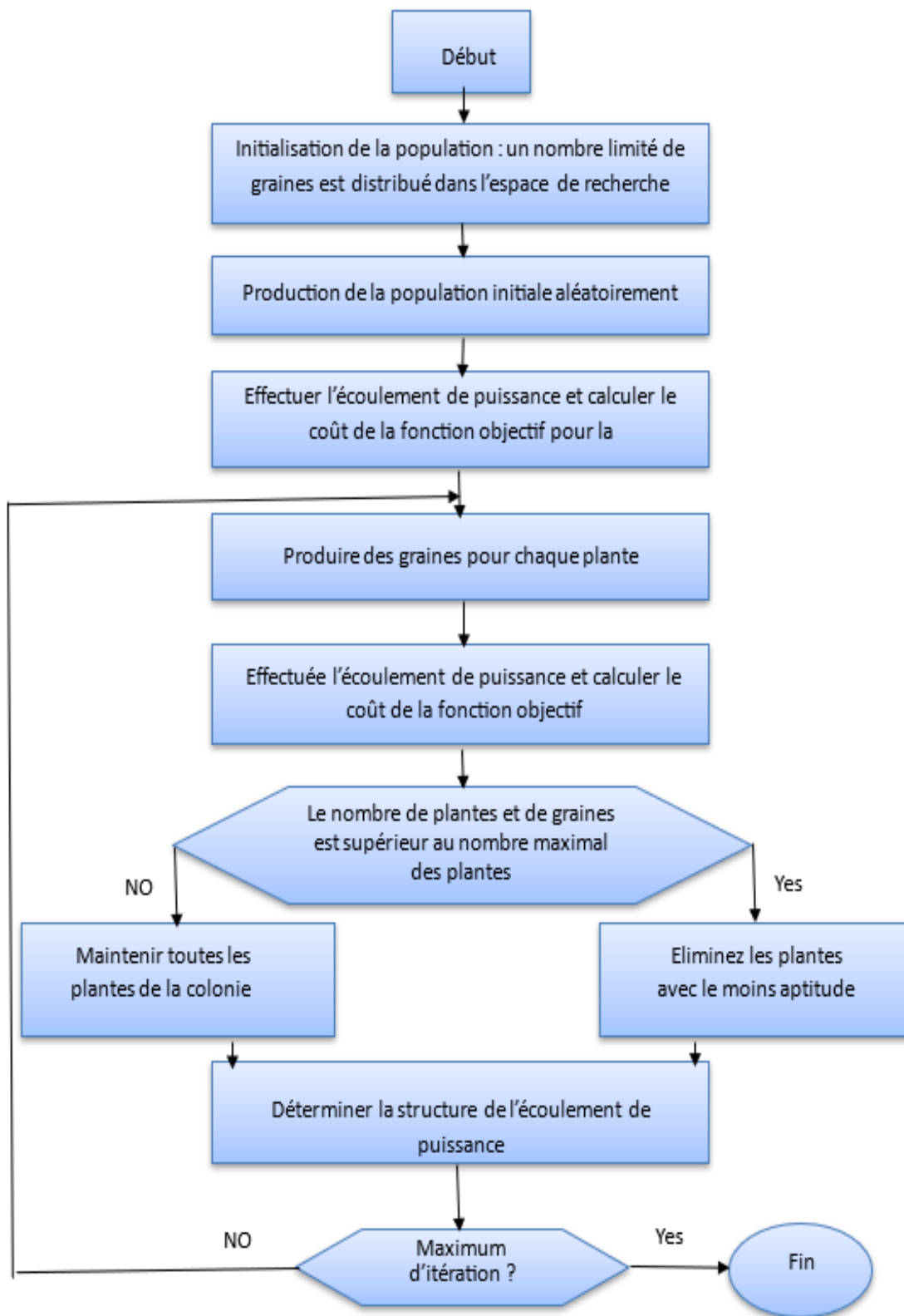
Les mauvaises herbes envahissent un champ en se dispersant aléatoirement et en occupant les zones inutilisées entre les cultures. Chaque mauvaise herbe prend des ressources de ces zones, fleurit, produit des graines, et engendre de nouvelles mauvaises herbes de manière autonome. Le nombre de graines produites dépend de l'aptitude de la mauvaise herbe à fleurir. Avec un environnement adapté et plus de ressources disponibles, les mauvaises herbes croissent plus rapidement et produisent davantage de graines. Les graines se dispersent aléatoirement dans le champ, donnant naissance à de nouvelles mauvaises herbes à fleurs. Ce cycle se répète jusqu'à ce que le nombre maximal de mauvaises herbes soit atteint en raison des ressources limitées. Seules les mauvaises herbes les mieux adaptées survivent, favorisant leur adaptation et leur développement continu au fil du temps [43].

#### **3-6-2 Etapes d'algorithme des herbes invasives :**

Cet algorithme est simple mais efficace pour converger vers des solutions optimales en utilisant des caractéristiques de base telles que l'ensemencement, la croissance et la concurrence dans une colonie de mauvaises herbes [44].

Pour simuler le comportement de l'habitat des mauvaises herbes, certaines caractéristiques de base du processus sont prises en compte comme suit [44] :

- 1- Initialisation de la population primaire : Un nombre limité de graines est distribué dans l'espace de recherche.
- 2- Reproduction : Chaque graine devient une plante à fleurs et produit des graines qui dépendent de leur valeur de fitness.
- 3- Propagation spectrale : Les graines produites par le groupe dans la distribution normale avec une position de plantation moyenne et un écart-type (ET).
- 4- Privation de concurrence : Si le nombre de graminées dépasse le nombre maximum de graminées dans la colonie ( $P_{max}$ ), la graminée ayant la plus mauvaise aptitude est retirée de la colonie de sorte qu'un nombre constant d'herbes reste dans la colonie.
- 5- Ce processus se poursuit jusqu'à ce que le nombre maximal d'itérations soit atteint, puis la fonction de coût minimale de la colonie des herbes est enregistrée.



**Figure 3-3** : Organigramme de la méthode iwo

### **3-7 Algorithme de colonie d'abeilles artificielles :**

L'algorithme d'optimisation ABC (artificial bee colony) est un algorithme évolutionnaire proposé par Karaboga. Cet algorithme s'inspire du comportement de recherche de nourriture des colonies d'abeilles. Il a été largement utilisé pour résoudre divers problèmes d'optimisation, tels que les problèmes d'optimisation globale et les problèmes d'optimisation multi-objectifs [45].

Dans l'algorithme ABC, la colonie d'abeilles comprend trois types d'abeilles : les abeilles employées, les abeilles observatrices et les abeilles éclaireuses. Les emplacements des sources de nourriture représentent les solutions candidates du problème d'optimisation, et les quantités de nectar des sources de nourriture représentent les aptitudes des solutions candidates [45].

#### **3-7-1 Principes d'algorithme ABC :**

Le processus de l'algorithme ABC s'inspire du comportement de butinage des abeilles, et les abeilles sont divisées en abeilles employées, abeilles observatrices et abeilles éclaireuses en fonction de la division du travail. Dans l'ensemble du processus, les abeilles favorisent l'évolution de la population par le partage d'informations. Le travail des abeilles employées consiste à rechercher des sources de nectar, et il existe une relation univoque entre l'abeille employée et la source de nourriture. Une fois que les abeilles employées ont fini de chercher toutes les sources de nourriture, elles partagent des informations avec les abeilles observatrices, telles que la direction, la distance et l'abondance de la source de nourriture. Les abeilles observatrices jugent alors de la qualité des sources de nourriture en fonction des informations obtenues et décident de suivre ou non les abeilles employées pour commencer l'exploitation. Lorsqu'une source de nourriture est épuisée, les abeilles qui se trouvent à cet endroit abandonnent le nectar et changent de rôle en tant qu'abeilles éclaireuses pour trouver une nouvelle source de nourriture afin d'éviter la pénurie de sources de nourriture en même temps. Après avoir trouvé une nouvelle source de nourriture, les abeilles éclaireuses redeviennent des abeilles employées [46].



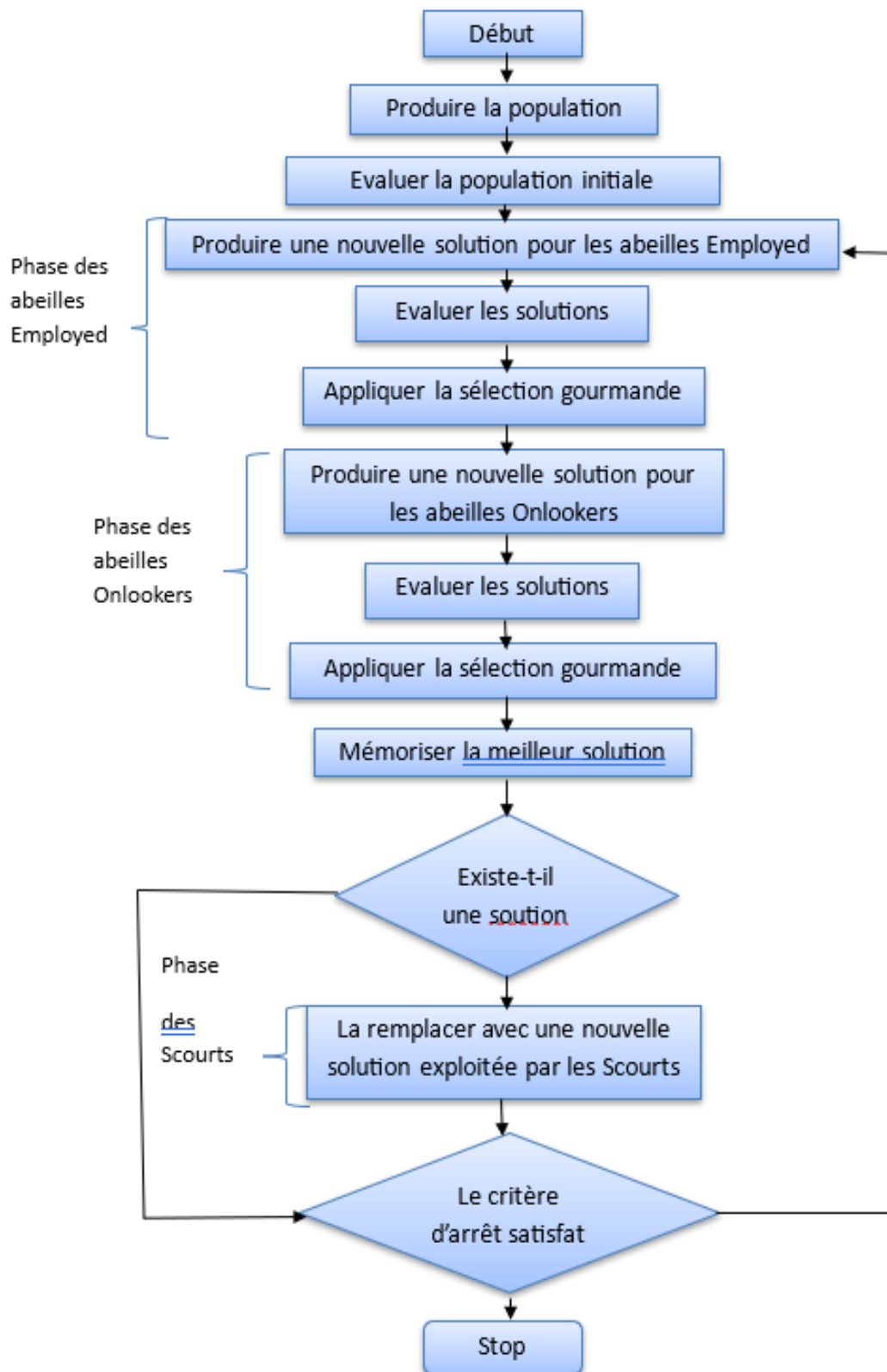


Figure 3-4 : Organigramme de la méthode ABC

### **3-8 Algorithme de construction des pyramides de Gizeh (GPC) :**

Le complexe des pyramides de Gizeh, également connu sous le nom de nécropole de Gizeh, est un site qui comprend trois grandes pyramides, toutes construites au cours de la quatrième dynastie de l'Égypte ancienne. La plus grande pyramide, également connue sous le nom des Sept Merveilles, s'appelle la pyramide de Khéops. Les deux autres pyramides s'appellent Khafre et Menkaure. Selon les archéologues, les méthodes de construction sont différentes les unes des autres, car la construction des pyramides s'est développée au fil du temps. La gestion des ouvriers était la question la plus importante dans la construction des pyramides. En raison du manque d'installations matérielles, du temps de construction relativement court et du grand nombre de blocs de pierre utilisés dans les pyramides, leur construction a été optimisée. Dans cette section, la méthode de construction, l'inspiration et l'algorithme proposé sont décrits en détail [47].

#### **3-8-1 Principes de GPC :**

Supposons que des blocs de pierre soient éparpillés sur le site de construction. Les ouvriers doivent pousser les blocs de pierre jusqu'à leur lieu d'installation. La position initiale de chaque bloc et son coût sont connus. Des rampes sont utilisées pour déplacer les blocs de pierre vers le lieu d'installation. La pente de la rampe et son frottement affectent le déplacement des blocs de pierre [47].

De plus, les ouvriers eux-mêmes se déplacent constamment pour trouver la meilleure position pour dominer le bloc de pierre. En raison des caractéristiques différentes de chaque travailleur, il est possible de remplacer les travailleurs afin d'équilibrer le pouvoir des travailleurs pour le transport d'un bloc de pierre. Par conséquent, la position de certains travailleurs sera remplacée par d'autres. Cette substitution entraîne une modification du système de déplacement des blocs de pierre et de l'équilibre des forces [47].

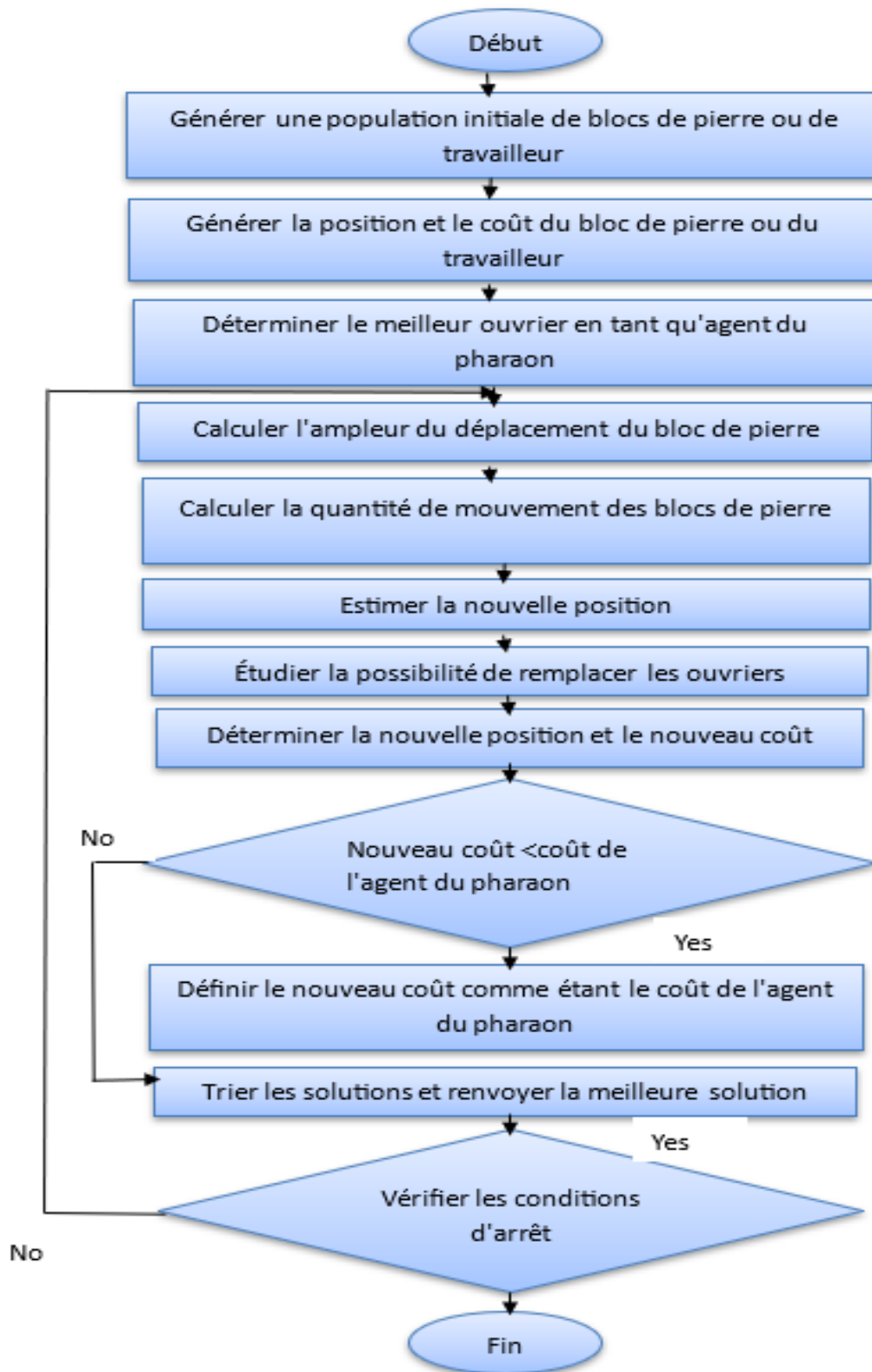


Figure 3-5: Organigramme de la méthode GPC

### **3-9 Conclusion :**

Ce chapitre introduit de manière générale les méthodes d'optimisation déterministes et les techniques d'optimisation globales, également appelées métaheuristiques. Il offre un aperçu des principes et des caractéristiques de ces méthodes. Nous avons ainsi abordé l'étude des algorithmes génétiques, les algorithmes d'optimisation par essais particuliers, les algorithmes des herbes invasive, les algorithmes des colonies des abeilles artificielles et l'algorithme de construction des pyramides de Gizeh.

# **Chapitre 04 :**

# **Résultats et discussion**

## **4-1 Introduction :**

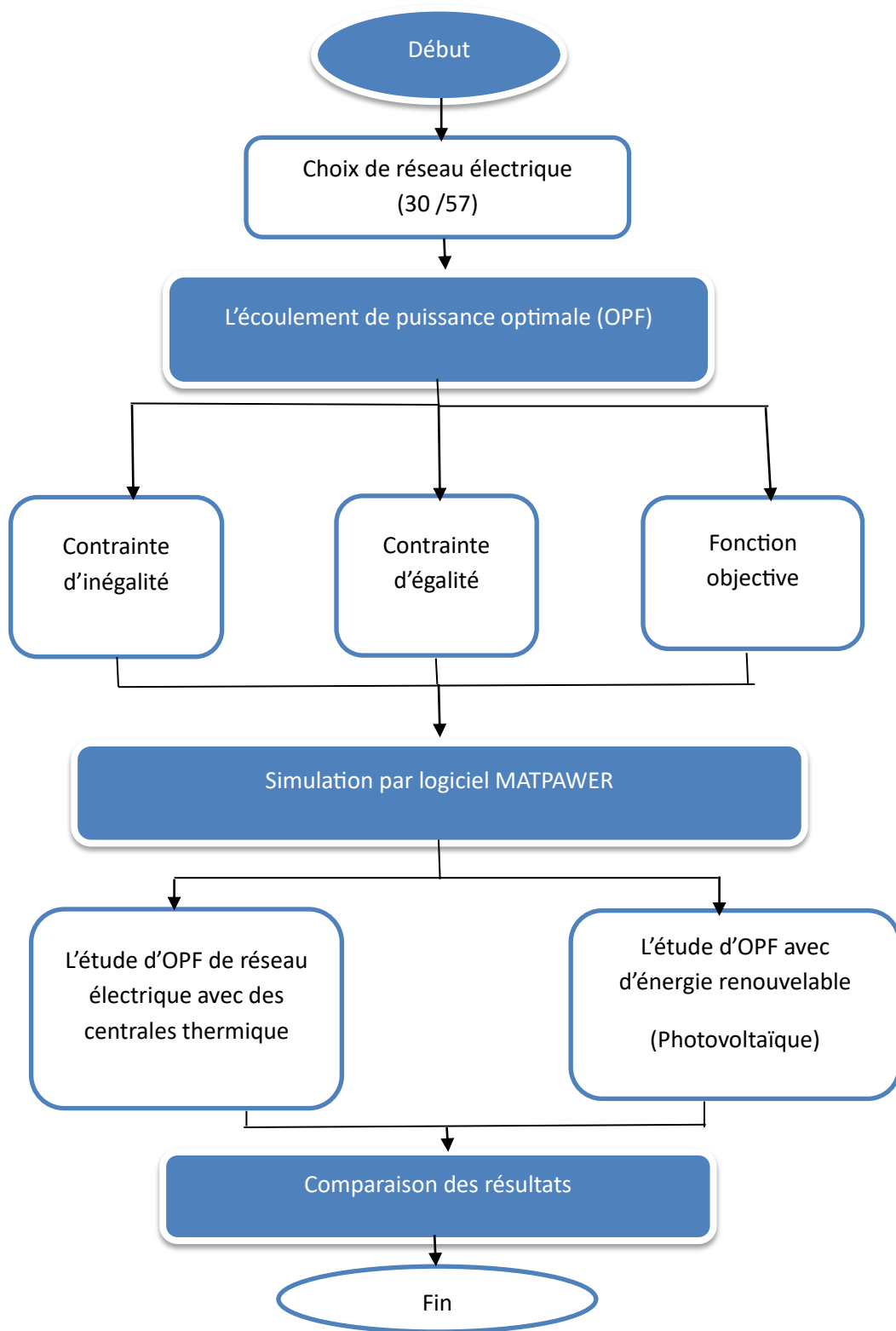
Le problème classique de l'OPF implique l'utilisation de générateurs thermiques alimentés par des combustibles fossiles. Avec l'augmentation de l'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque dans le réseau, il est essentiel d'étudier l'OPF en tenant compte des incertitudes associées à ces sources d'énergie.

L'objectif de ce chapitre est de démontrer les performances de l'emplacement stratégique des centrales d'énergie renouvelable, en particulier solaire photovoltaïque, pour résoudre le problème d'écoulement de puissance optimal dans un réseau électrique. Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé des algorithmes implémentés dans le logiciel MATPOWER.

Pour deux types de réseaux électriques, 30-nœuds et le réseau 57- nœuds.

Nous choisissons de formuler notre problème dans l'outil d'optimisation. MATPOWER/MATLAB (7.1). Les méthodes proposées sont appliquées aux réseaux test 30- nœuds et 57- nœuds. Nous comparons les résultats fournis par MATPOWER/MATLAB. Dans un autre temps.

La figure (4-1) présente l'organigramme de l'approche proposé de la simulation de l'écoulement de puissance optimale



**Figure 4-1** : Organigramme de l'approche proposé de la simulation de L'OPF

## 4-2 Présentation de logiciel MATPOWER :

MATPOWER est une boîte à outils MATLAB permettant de résoudre les problèmes d'optimisation dans les réseaux électriques. Il est conçu comme un outil de simulation pour les chercheurs et les éducateurs qui sont facile à utiliser et à modifier. MATPOWER est conçu pour donner les meilleures performances possibles tout en gardant le code simple à comprendre et modifier. MATPOWER comprend plusieurs solveurs pour le problème d'écoulement de puissance optimal (OPF), auxquels on peut accéder via la fonction « runopf ». En plus d'imprimer la sortie à l'écran, ce qu'il fait par défaut, « runopf » renvoie éventuellement la solution et les résultats dans les arguments de sortie [48].

## 4-3 Les éléments contrôlés par le MATPOWER

Le vecteur d'options MATPOWER contrôle les éléments suivants [48] :

- ✓ Algorithme de d'écoulement de puissance.
- ✓ Critère de terminaison du flux de puissance
- ✓ Options de flux de puissance (par exemple, application des limites de production de puissance réactive), Algorithme OPF. Algorithmes par défaut OPF pour différents modèles de coûts.
- ✓ Paramètres de conversion des coûts OPF, Critère de résiliation OPF.
- ✓ Options OPF (par exemple, puissance active, apparente, courant pour les limites deligne).
- ✓ Niveau verbeux.
- ✓ Impression de résultats.

## 4-4 Résultats et interprétations :

Dans le but de traiter les problèmes OPF stochastiques intégrant des générateurs solaires photovoltaïques et visant à minimiser le coût de production, nous avons effectué une analyse sur les réseaux de 30 et 57 nœuds en utilisant des méthodes Métaheuristiques (GA, PSO, ABC, IWO et GPC). Les algorithmes proposés ont été implémentés à l'aide de MATLAB matpower.



Pour toutes les simulations, nous avons choisi une population de 200 individus. De plus, le nombre maximum d'itérations a été fixé à 1000 afin d'assurer une comparaison équitable entre les différents cas.

#### 4-4-1 Résultats et interprétations pour le réseau 30 nœuds (30 bus) :

Le réseau 30 nœuds comporte de 41 branches, 30 jeux de barres et 6 générateurs.

Les caractéristiques du réseau 30 nœuds sont données de la figure (4-2)

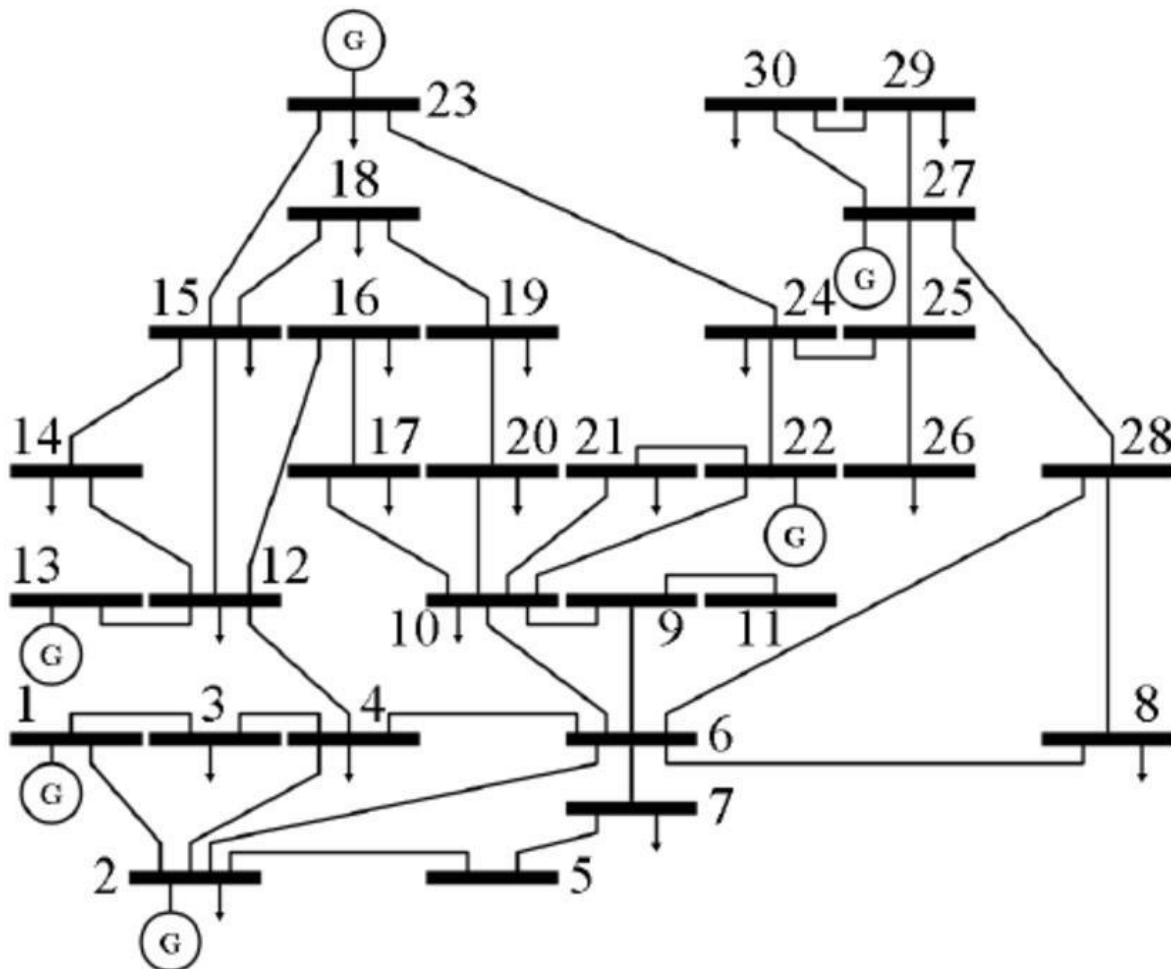


Figure 4-2: Schéma unifilaire de réseau de 30 jeux de barres

**1er cas : simulation de réseau 30 nœuds sans intégration de générateur solaire PV**  
(avec six générateurs thermiques) en utilisant les méthodes Métaheuristique le tableau (4-1)  
montre les résultats de l'écoulement de puissance optimal.

	Min	Max	GA	PSO	ABC	IWO	GPC
Pgt1(MW)	0	80	36,9054	34,8274	36,9584	48,3361	40,7215
Pgt2(MW)	0	80	47,1176	49,6620	47,1719	51,6211	54,5055
Pgt3(MW)	0	50	24,9024	25,5342	24,8224	21,3480	22,4428
Pgt4(MW)	0	55	39,1188	37,3293	39,0592	40,3201	40,0267
Pgt5(MW)	0	30	21,5474	20,9130	21,5598	14,7405	15,3455
Pgt6(MW)	0	40	21,8537	23,4613	21,8680	15,4625	19,1053
Qgt1(MVars)	-20	150	-2,1366	-19,3108	-0,0454	0,8067	-11,5709
Qgt2(MVars)	-20	60	5,2931	9,7756	4,0362	3,9864	-10,2881
Qgt3(MVars)	-15	62.5	24,7709	29,1556	25,0403	24,7758	37,9300
Qgt4(MVars)	-15	48.7	13,2701	18,3964	12,0234	12,9030	27,9839
Qgt5(MVars)	-10	40	5,1638	12,3579	5,2736	4,7849	3,4919
Qgt6(MVars)	-15	44.7	26,6817	29,2233	26,4104	27,0376	35,9088
V1(pu)	0.95	1.05	1,0415	0,9726	1,0453	1,0476	0,9655
V2(pu)	0.95	1.1	1,0384	0,9771	1,0413	1,0423	0,9640
V13(pu)	0.95	1.1	1,0806	1,0461	1,0824	1,0816	1,0566
V22(pu)	0.95	1.1	1,0414	1,0054	1,0437	1,0411	1,0129
V23(pu)	0.95	1.1	1,0536	1,0274	1,0557	1,0478	1,0146
V27(pu)	0.95	1.1	1,0628	1,0306	1,0619	1,0641	1,0542
Cout gt(\$/h)			579,6688	581,0266	579,5853	576,8191	577,7199
E(t/h)			3,3002	3,3352	3,3028	3,9033	3,7227
Cout E(\$/h)			66,0048	66,7046	66,0564	78,0676	74,4558
Cout T(\$/h)			645,6737	647,7312	645,6417	654,8868	652,1757
Pertes (MW)			2,2457	2,5273	2,2400	2,6285	2,9476
VD (pu)			0,7594	0,3702	0,80564	0,7741	0,4801

**Tableau 4-1:** Solution de l'OPF pour le réseau 30 nœuds sans intégration de générateur PV

## **Interprétations :**

Pour le réseau 30 nœuds sans intégration de PV on observe que :

Les valeurs de puissance active, réactive et les tensions sont dans leurs limites.

L'émission de carbone est élevée, ce qui conduit à l'augmentation du coût des émissions.

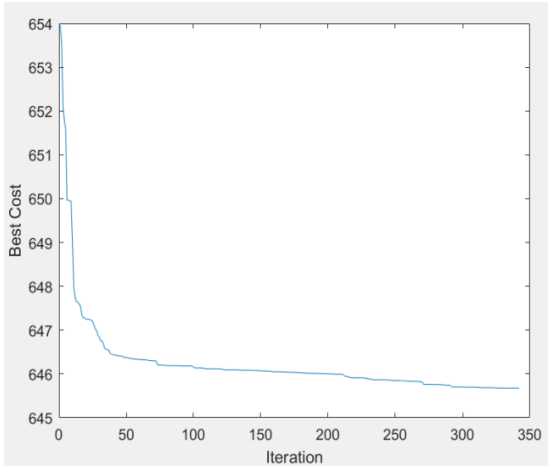
Le coût des générateurs thermiques est significatif entre 576,8191 et 581,0266 \$/h.

Le coût total varie entre les différentes méthodes Métaheuristique : le ABC présente le meilleur coût, à 645,6417 \$/h, suivi du GA avec une valeur de 645,6737 \$/h. Les méthodes PSO, GPC et IWO ont respectivement des coûts de 647,7312 \$/h, 652,1757 \$/h et 654,8868 \$/h.

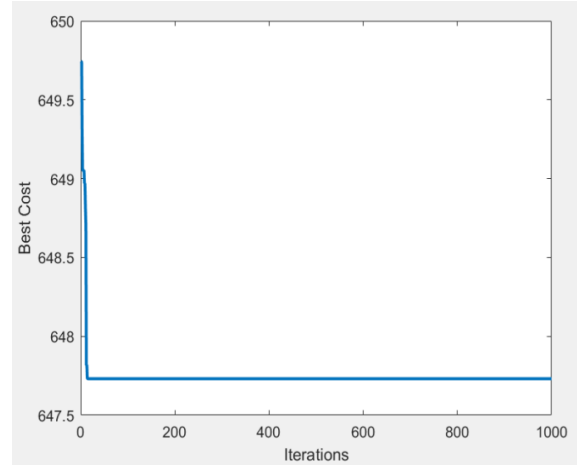
Les pertes de puissance varient entre 2,2400 et 2,9476 MW, tandis que l'écart de tension VD se situe entre 0,4801 et 0,80564 pu.

Le meilleur coût pour l'OPF est obtenu avec la méthode ABC, suivie par GA, PSO, GPC enfin le coût le plus élevé est associé à la méthode IWO.

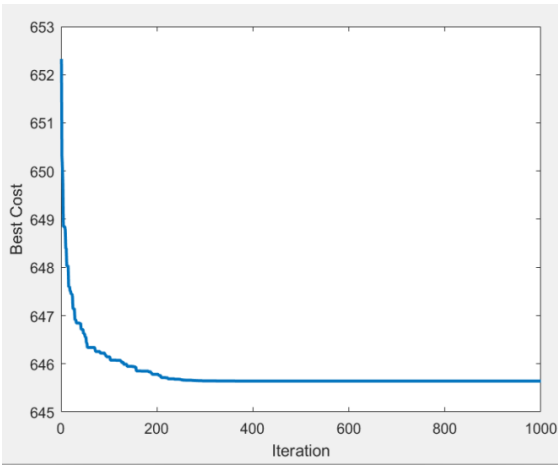
Les figures ci-dessous représentent le meilleur coût pour les différentes méthodes Métaheuristiques :



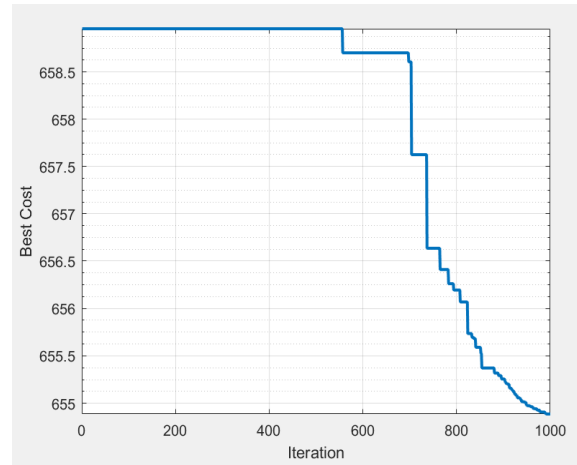
**Figure 04-3 :** Meilleur cout pour GA réseau30 nœuds sans PV



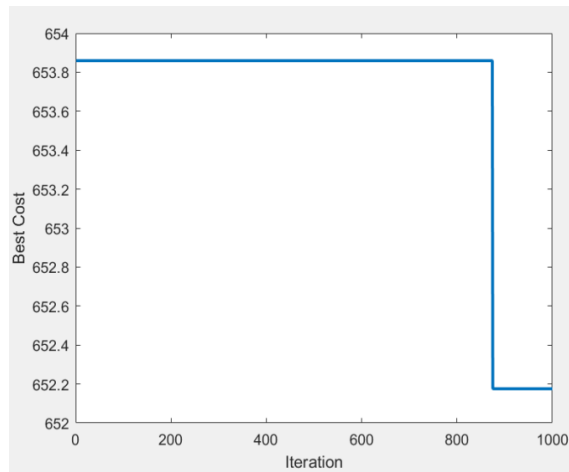
**Figure 4-3:** Meilleur cout pour PSO réseau30 nœuds sans PV



**Figure 4-5 :** Meilleur cout pour ABC réseau30 nœuds sans PV



**Figure 4-4 :** Meilleur cout pour IWO réseau30 nœuds sans PV



**Figure 4-7 :** Meilleur cout pour GPC réseau30 nœuds sans PV

Les figures ci-dessous représentent une comparaison entre les puissances active, les puissances réactive et les différents couts pour chaque algorithme :

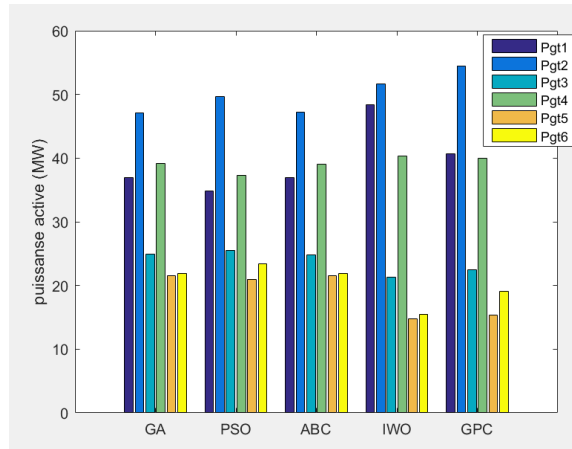


Figure 4-8 : Comparaison entre les puissances actives de réseau30 nœuds sans PV

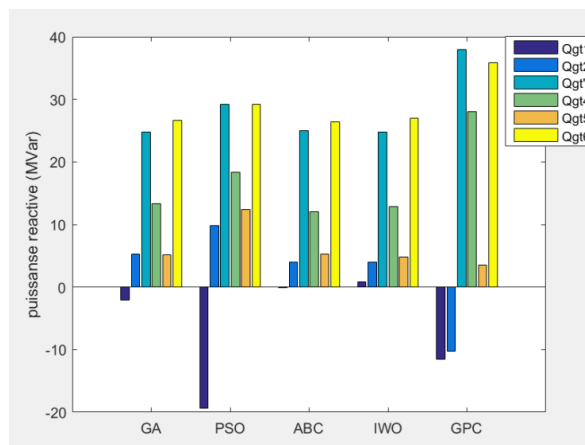


Figure 4-9 : Comparaison entre les puissances réactives de réseau30 nœuds sans PV

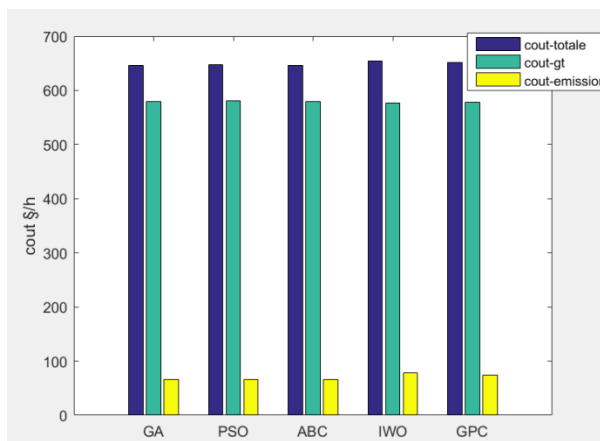
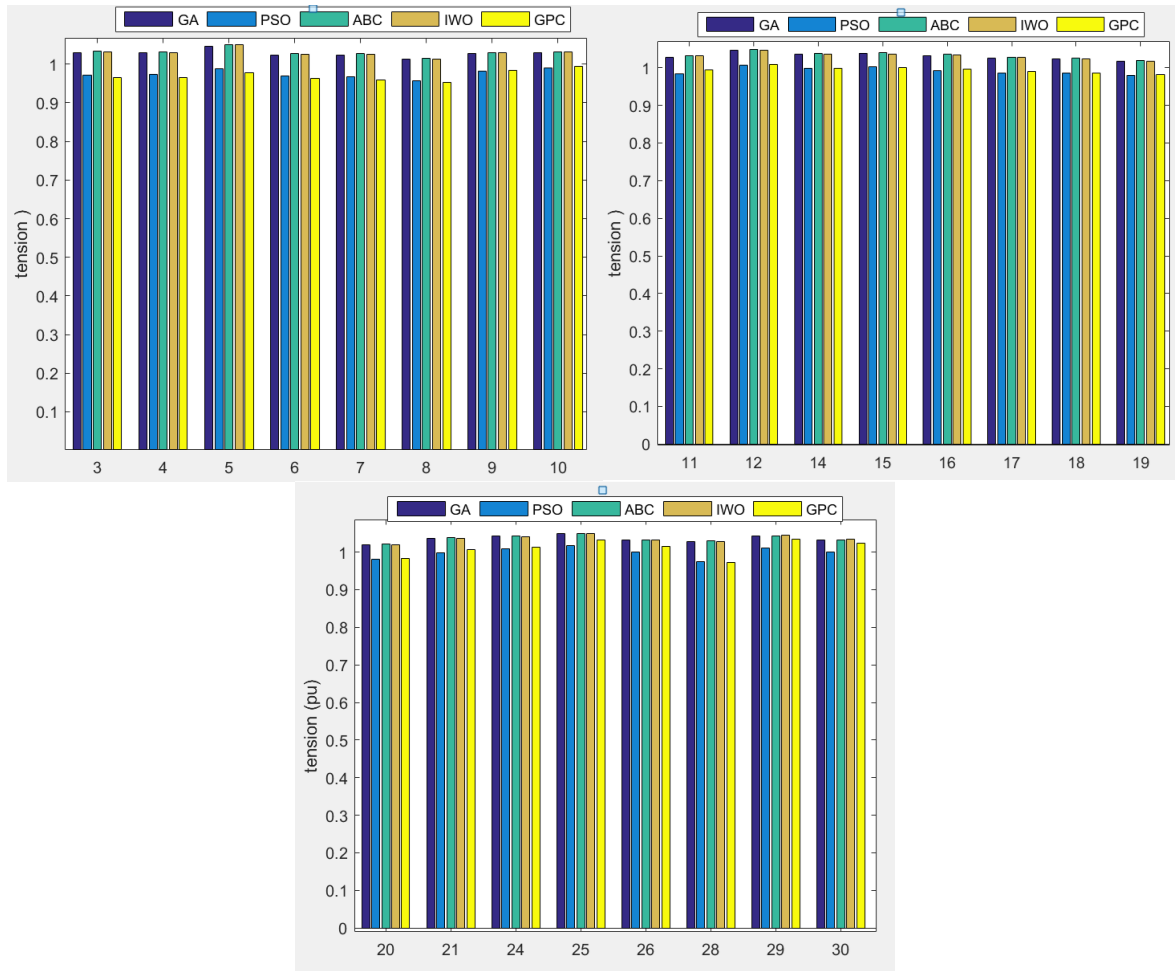


Figure 4-10 : Comparaison entre les différents couts de réseau30 nœuds sans PV

## Profil des tensions des nœuds de charge : réseau30 nœuds sans PV



**Figure 4-11** : tensions des nœuds de charge réseau30 nœuds sans PV

### Commentaires :

Toutes les valeurs de puissances actives des générateurs thermiques ( $P_{tg}$ ) se situent dans leurs limites, entre les valeurs minimales et maximales, de même que pour les puissances réactives ( $Q_{gt}$ ).

Le coût des générateurs thermiques ( $C_{out\ gt}$ ) constitue la partie majeure du coût total, tandis que le coût des émissions est le moins élevé.

Les tensions des nœuds de charge ont entre valeur min et max.

**2 ème cas : simulation de réseau 30 nœuds avec intégration d'un générateur solaire PV** au nœud 22 et cinq générateurs thermiques en utilisant les méthodes métaheuristique le tableau (4-2) montre les résultats de l'écoulement de puissance optimal.

	Min	Max	GA	PSO	ABC	IWO	GPC
Pgt1(MW)	0	80	32,7038	30,9923	32,6979	28,2259	32,3728
Pgt2(MW)	0	80	42,2933	38,6661	42,2744	54,4040	49,4835
Pgs1(MW)	0	50	49,9999	49,8148	49,9998	48,5091	50
Pgt3(MW)	0	55	30,9014	40,6843	30,8722	31,1655	31,1945
Pgt4(MW)	0	30	17,5036	14,7601	17,4892	6,6962	14,6284
Pgt5(MW)	0	40	17,7843	16,8297	17,8513	22,2346	14,1455
Qgt1(MVars)	-20	150	-0,8599	-10,7050	-0,7185	-0,4698	-14,1142
Qgt2(MVars)	-20	60	3,1654	-15,8922	2,5732	1,3398	-3,1276
Qgs1(MVars)	-15	62.5	25,9234	25,0135	26,1965	26,5814	22,7119
Qgt3(MVars)	-15	48.7	12,2158	27,4122	11,7775	12,8567	36,0977
Qgt4(MVars)	-10	40	4,8154	15,1821	5,3653	4,6965	7,02477
Qgt5(MVars)	-15	44.7	26,1508	40,4324	26,2161	26,9068	32,1284
V1(pu)	0.95	1.05	1,0436	0,9729	1,0437	1,0429	0,9679
V2(pu)	0.95	1.1	1,0402	0,9709	1,0401	1,0401	0,9692
V13(pu)	0.95	1.1	1,0815	1,0816	1,0825	1,0834	1,0449
V22(pu)	0.95	1.1	1,0546	1,0276	1,0555	1,0541	1,0074
V23(pu)	0.95	1.1	1,0548	1,0496	1,0564	1,0463	1,0152
V27(pu)	0.95	1.1	1,0594	1,0656	1,0589	1,0609	1,0685
Cout gt(\$/h)			421,9387	428,3504	421,9531	429,0510	421,3248
E(t/h)			2,2575	2,2019	2,2568	2,7970	2,5188
Cout E(\$/h)			45,1517	44,0394	45,1364	55,9411	50,3763
Cout gs(\$/h)			150,7396	151,1931	150,7707	145,0077	150,8677
Cout T(\$/h)			616,3815	621,2544	616,3109	629,9999	621,0538
Pertes (MW)			1,9866	2,5475	1,9851	2,0354	2,6249
VD (pu)			0,8490	0,4800	0,8601	0,8403	0,5349

**Tableau 4-2** : solution de l'OPF pour le réseau 30 nœuds avec intégration d'un PV

### **Interprétations :**

Pour le réseau 30 nœuds avec intégration d'un générateur solaire PV au nœud 22 on observe que :

Les valeurs de puissance active, réactive et les tensions sont dans leurs limites respectives.

L'émission de carbone est élevée et les valeurs sont proches, ce qui entraîne une augmentation du coût des émissions.

Le coût des générateurs thermiques est significatif, se situant entre 421,3248 et 429,0510 \$/h.

Le coût de générateur solaire PV est presque identique pour les cinq méthodes.

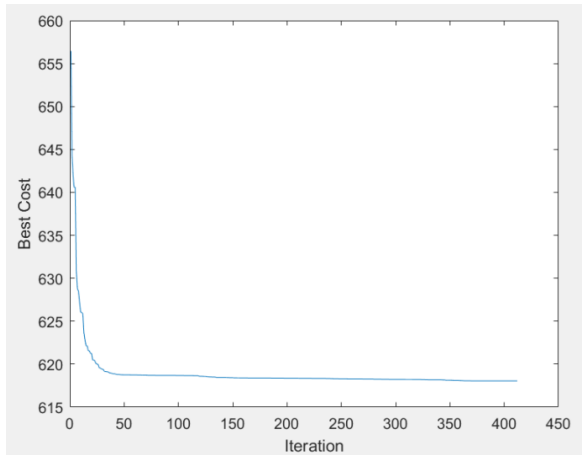
Le coût total varie selon les différentes méthodes métaheuristiques : le ABC affiche le meilleur coût à 616,3109 \$/h, suivi du GA avec 616,3815 \$/h. Les méthodes GPC, PSO et IWO présentent des coûts respectifs de 621,0538 \$/h, 621,2544 \$/h et 629,9999 \$/h.

Les pertes de puissance varient entre 1,9851 et 2,6249 MW, tandis que l'écart de tension VD se situe entre 0,4800 et 0,8601 pu.

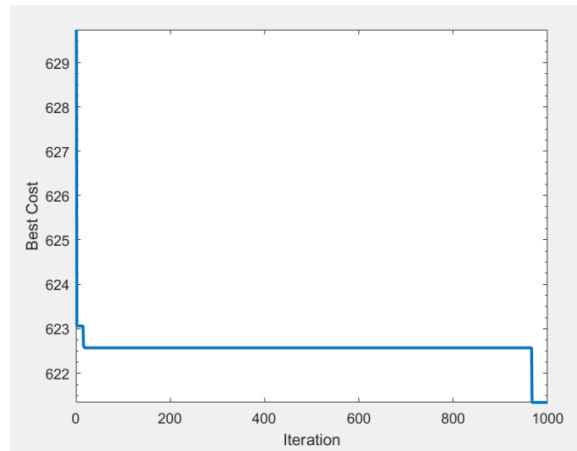
Le meilleur coût pour l'OPF est obtenu avec la méthode ABC, suivie par GA, GPC et PSO, tandis que le coût le plus élevé est associé à la méthode IWO.

Les figures ci-dessous représentent le meilleur coût pour les différentes méthodes Métaheuristiques :

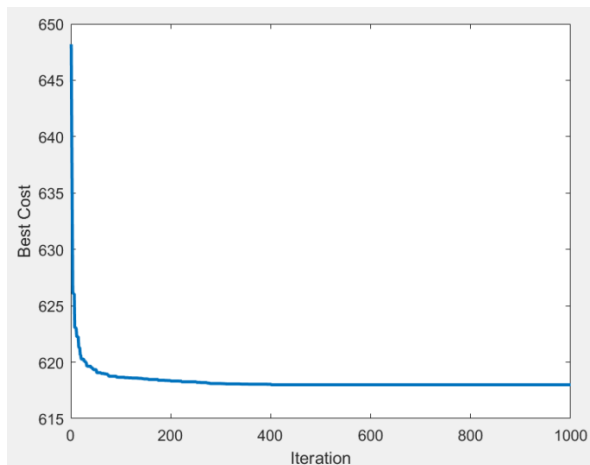




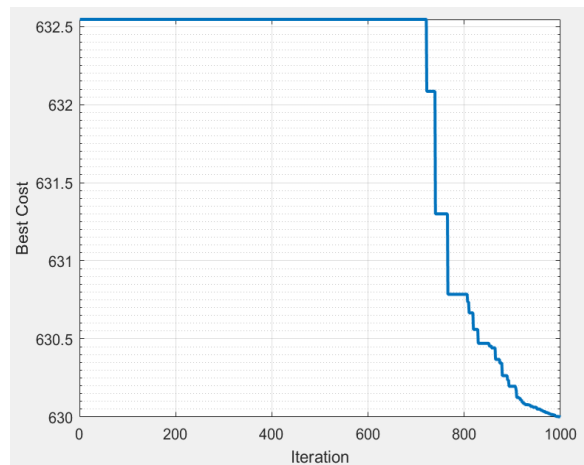
**Figure 4-12** : Meilleur cout pour GA réseau 30 nœuds avec PV



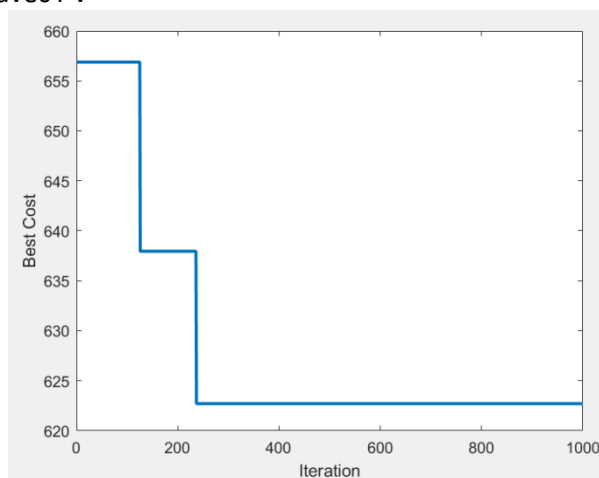
**Figure 4-13** : Meilleur cout pour PSO réseau 30 nœuds avec PV



**Figure 4-14** : Meilleur cout pour ABC réseau 30 nœuds avec PV



**Figure 4-15** : Meilleur cout pour IWO réseau 30 nœuds avec PV



**Figure 4-16** : Meilleur cout pour GPC réseau 30 nœuds avec PV

Les figures ci-dessous représentent une Comparaison entre les puissances active, les puissances réactive et les différents coûts pour chaque algorithme :

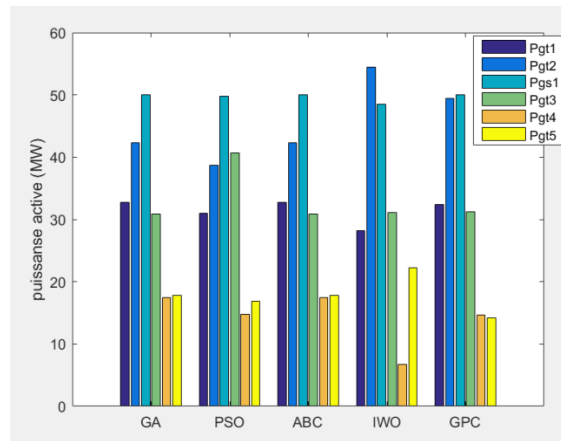


Figure 4-17 : Comparaison entre les puissances actives de réseau 30 nœuds avec PV

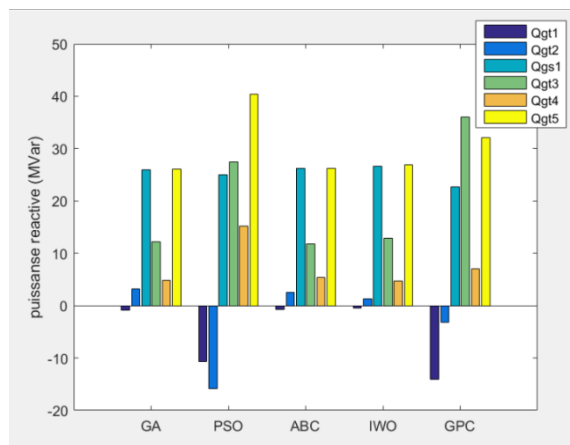


Figure 4-18 : Comparaison entre les puissances réactives de réseau 30 nœuds avec PV

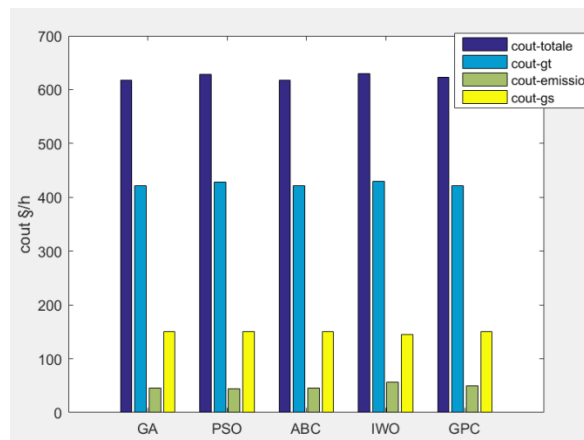


Figure 4-19 : Comparaison entre les différents coûts de réseau 30 nœuds avec PV

## Profil des tensions des nœuds de charge : réseau 30 nœuds avec PV

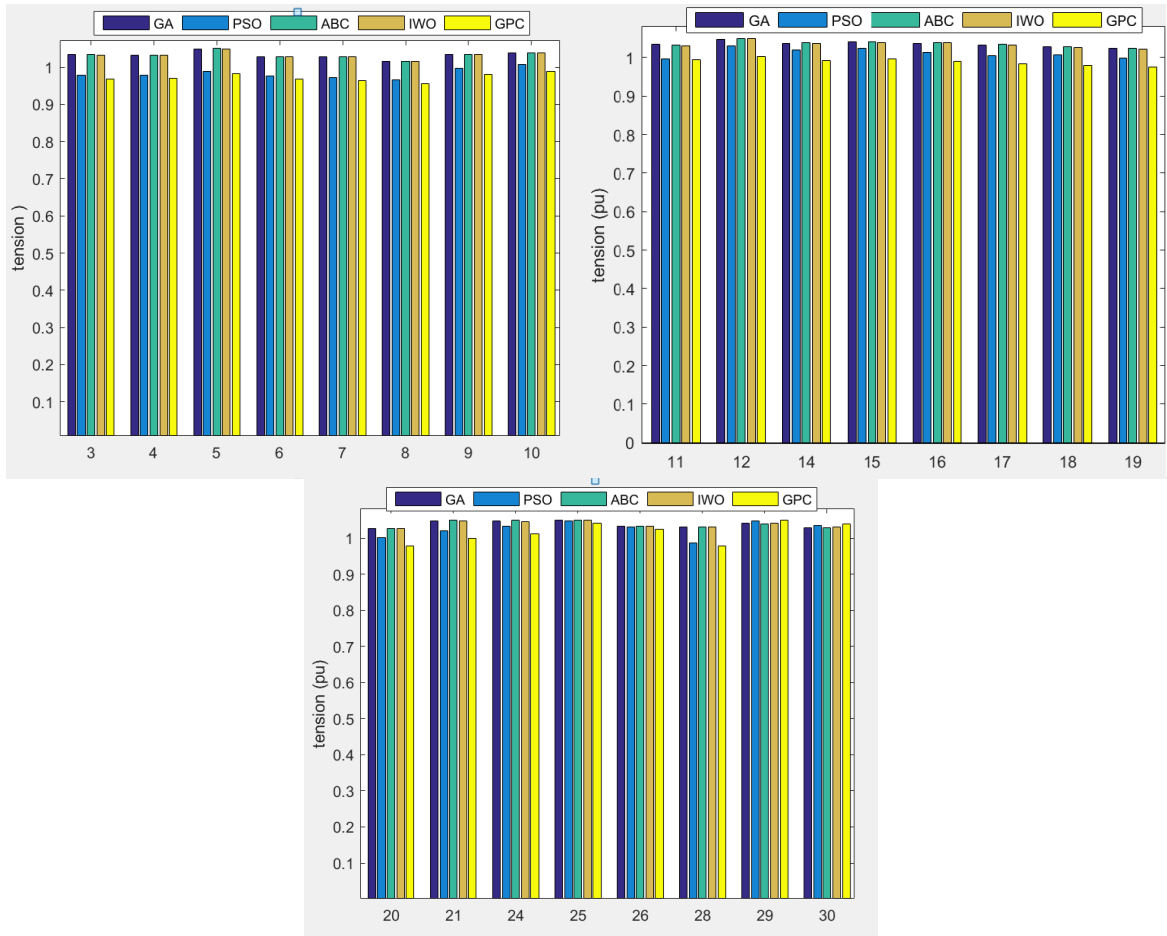


Figure 4-20 : tensions des nœuds de charge réseau 30 nœuds avec PV

### Commentaires :

Toutes les valeurs de puissances actives des générateurs thermiques ( $P_{gt}$ ) et de générateur solaire PV ( $P_{gs}$ ) se situent dans leurs limites, entre les valeurs minimales et maximales, de même que pour les puissances réactives des générateurs thermiques ( $Q_{gt}$ ) et PV ( $Q_{gs}$ ).

Le coût des générateurs thermiques ( $C_{out\ gt}$ ) constitue la partie majeure du coût total, après celui de générateur solaire PV, tandis que le coût des émissions est le plus faible.

Les tensions des nœuds de charge ont entre valeur min et max.

**3 ème cas : simulation de réseau 30 nœuds avec intégration de deux générateurs solaire PV** au nœud 22 et 25 en plus les quatre générateurs thermiques en utilisant les méthodes métaheuristique le tableau (4-3) montre les résultats de l'écoulement de puissance optimal.

	Min	Max	GA	PSO	ABC	IWO	GPC
Pgt1(MW)	0	80	30,0074	29,5065	30,1178	41,1739	24,6833
Pgt2(MW)	0	80	39,1068	43,3639	39,2688	54,8212	48,6857
Pgs1(MW)	0	50	47,1234	49,0065	46,1667	23,9239	50
Pgs2(MW)	0	55	44,9027	43,5955	45,3253	41,2752	35,6367
Pgt3(MW)	0	30	15,0109	14,4441	15,0932	14,4561	13,5334
Pgt4(MW)	0	40	15,2098	11,9755	15,3838	16,0512	19,0007
Qgt1(MVars)	-20	150	-2,1575	5,6730	0,0288	-0,1575	-10,2926
Qgt2(MVars)	-20	60	5,0990	-0,1224	5,4233	4,0792	-6,3394
Qgs1(MVars)	-15	62.5	25,5115	40,0353	25,1335	26,4401	26,1076
Qsg2(MVars)	-15	48.7	14,3976	24,6780	11,5455	12,3657	28,6926
Qgt3(MVars)	-10	40	4,3417	2,6881	4,9986	4,6938	9,5051
Qgt4(MVars)	-15	44.7	25,8826	5,4415	25,2839	26,3848	32,1597
V1(pu)	0.95	1.05	1,0359	0,9837	1,0440	1,0457	0,9689
V2(pu)	0.95	1.1	1,0333	0,9776	1,0406	1,0416	0,9691
V13(pu)	0.95	1.1	1,0726	0,96958	1,0765	1,0805	1,0485
V22(pu)	0.95	1.1	1,0456	1,0053	1,0494	1,0437	1,0117
V23(pu)	0.95	1.1	1,0446	0,9834	1,0495	1,0482	1,0204
V27(pu)	0.95	1.1	1,0640	1,0393	1,0620	1,0634	1,0540
cout gt(\$/h)			275,3036	273,2805	277,1268	367,972	299,4395
E(t/h)			1,6144	1,7398	1,6294	2,2996	1,9428
Cout E(\$/h)			32,2890	34,7977	32,5899	59,0533	38,8577
Cout gs(\$/h)			269,9251	272,7865	267,2177	181,7889	248,3068
Cout T(\$/h)			577,5178	580,8648	576,9346	608,8150	586,6041
Pertes (MW)			2,1614	2,6922	2,1559	2,5017	2,3400
VD (pu)			0,7050	0,6477	0,8026	0,7835	0,4577

**Tableau 4-3** : solution de l'OPF pour le réseau 30 nœuds avec intégration de 2 PV

## **Interprétations :**

Pour le réseau 30 nœuds avec intégration de deux générateurs solaire PV on observe que :

Les valeurs de puissance active, réactive et les tensions sont dans leurs limites.

Le coût des émissions varie entre 32,2890 jusqu'à 59,0533\$/h.

Le coût des générateurs thermiques est significatif entre 273,2805 et 367,972 \$/h.

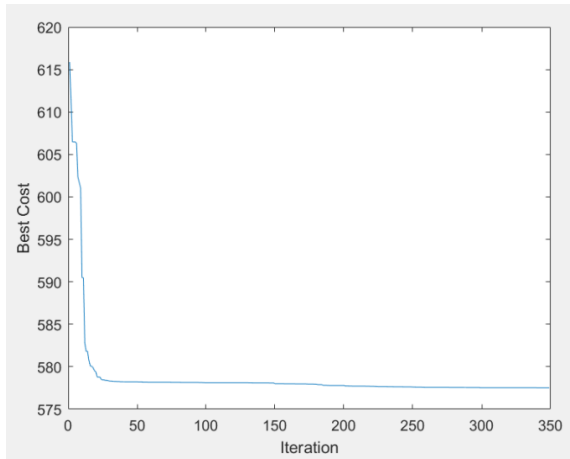
Le coût de générateur solaire PV se situant entre 181,7889 et 272,7865 \$/h.

Le coût total : le ABC présente le meilleur coût, à 576,9346\$/h, suivi du GA avec une valeur de 577,5178\$/h après PSO, GPC et IWO ont respectivement des coûts de 580,8648 \$/h, 586,6041 \$/h et 608,8150 \$/h.

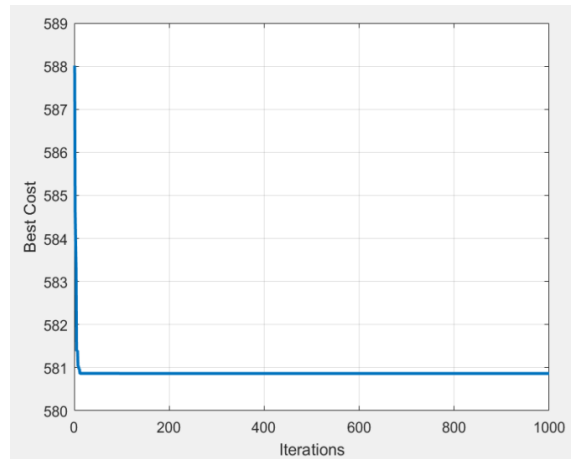
Les pertes de puissance varient entre 2,1559 et 2,6922 MW, tandis que l'écart de tension VD se situe entre 0,4577 et 0,8026 pu.

Le meilleur coût pour l'OPF est obtenu avec la méthode ABC, suivie par GA, PSO, GPC enfin IWO.

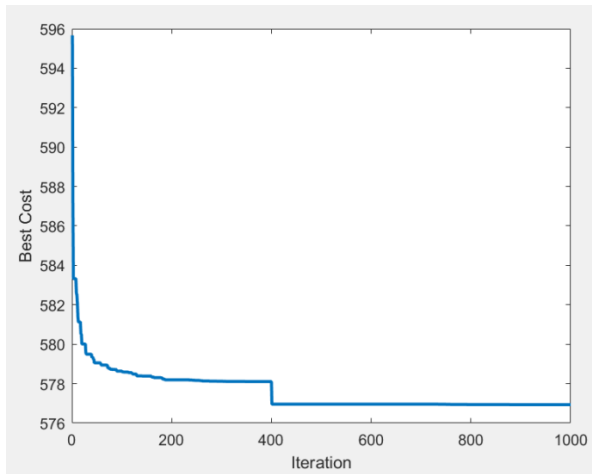
Les figures ci-dessous représentent le meilleur coût pour les différentes méthodes Métaheuristiques :



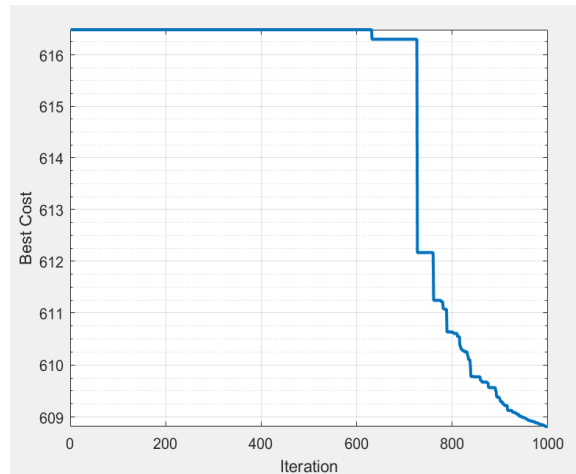
**Figure 4-21** : Meilleur cout pour GA réseau 30 nœuds avec 2 PV



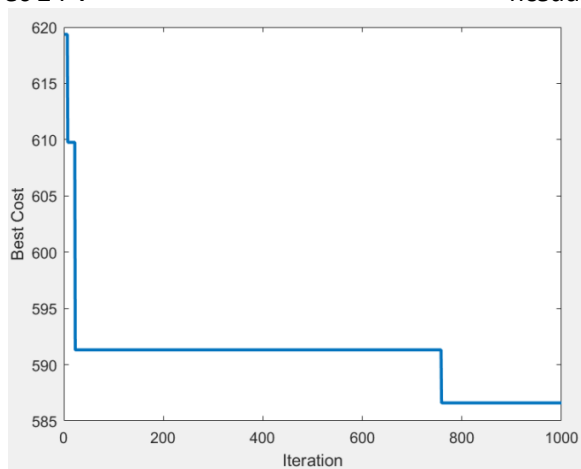
**Figure 4-22** : Meilleur cout pour PSO réseau 30 nœuds avec 2 PV



**Figure 4-23** : Meilleur cout pour ABC réseau 30 nœuds avec 2 PV



**Figure 4-24** : Meilleur cout pour IWO réseau 30 nœuds avec 2 PV



**Figure 4-25** : Meilleur cout pour GPC réseau 30 nœuds avec 2 PV

Les figures ci-dessous représentent une comparaison entre les puissances active, les puissances réactive et les différents couts pour chaque algorithme :

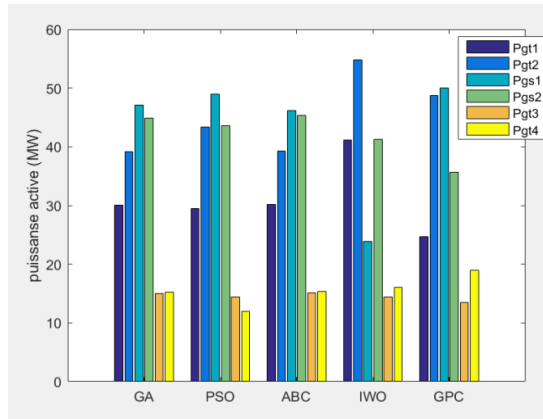


Figure 4-26 : Comparaison entre les puissances actives de réseau 30 nœuds avec 2 PV

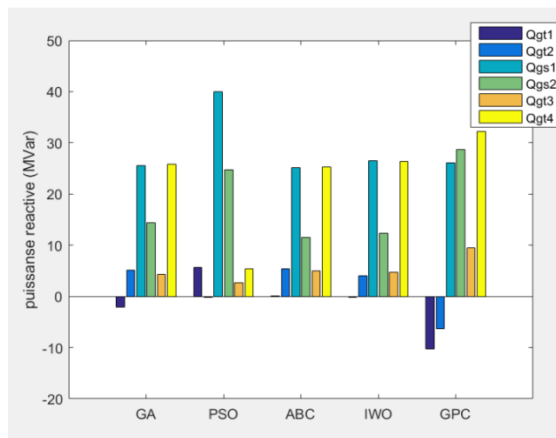


Figure 4-27 : Comparaison entre les puissances réactives de réseau 30 nœuds avec 2 PV

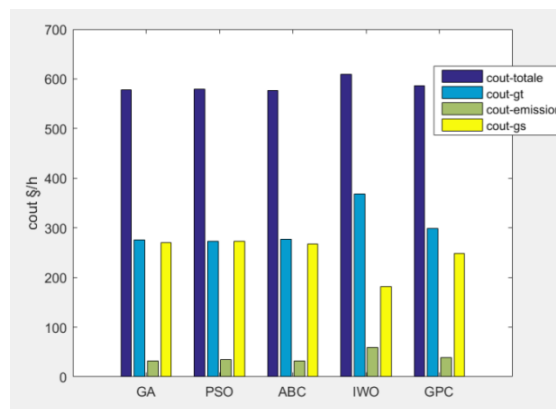


Figure 4-28 : Comparaison entre les différents couts de réseau 30 nœuds avec 2 PV

## Profile des tensions des nœuds de charge : réseau30 nœuds avec 2 PV

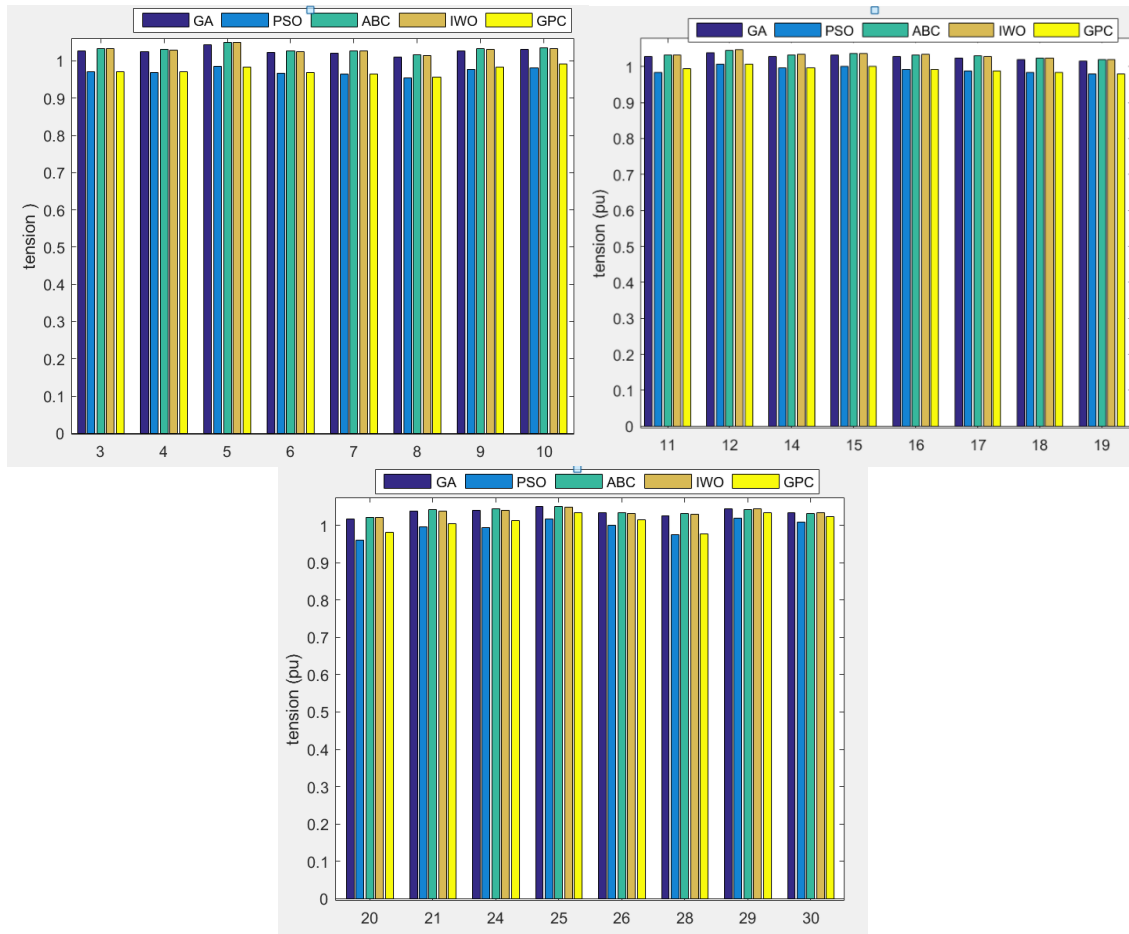


Figure 4-29 : tensions des nœuds de charge réseau30 nœuds avec 2 PV

### Commentaires :

Toutes les valeurs de puissances actives des générateurs thermiques ( $P_{gt}$ ) et des générateurs solaires PV ( $P_{gs}$ ) se situent dans leurs limites, entre les valeurs minimales et maximales, de même que pour les puissances réactives des générateurs thermiques ( $Q_{gt}$ ) et des générateurs solaires PV ( $Q_{gs}$ ).

Le coût des générateurs thermiques (Coût  $gt$ ) constitue la partie majeure du coût total, après celui des générateurs solaires PV, tandis que le coût des émissions est le plus faible.

Les tensions des nœuds de charge ont entre valeur min et max.



## **Comparaison entre les cas de réseau 30 nœuds :**

Avec l'intégration des générateurs solaire PV, l'intégration d'un PV et après l'intégration de deux PV on remarque que :

Le coût des générateurs thermiques diminue par rapport au réseau sans intégration de PV, tandis que le coût des générateurs solaires PV augmente.

Les valeurs des émissions de carbone diminuent, ce qui réduit le coût des émissions.

Les pertes de puissance sont quasiment identiques, et l'écart de tension VD reste également presque le même pour les différents cas.

Le coût total diminue avec l'intégration d'un PV, passant de 15 à, 31 \$/h. et devient encore plus avantageux avec l'intégration de deux PV, se réduisant de 37 à 68 \$/h pour les différents méthodes métaheuristiques utilisées.

Avec l'intégration d'un générateur solaire PV, le coût total diminue de : 4.77 % avec GPC, 4.54 % avec ABC, 4.53 % avec GA, 4.03 avec PSO et de 2.45 avec IWO. Tandis qu'avec l'intégration de deux générateurs solaire PV, la réduction du coût total est de : 10.64 % avec ABC ,10.55 % avec GA, 10.27 % avec PSO, 10.03 % avec GPC et 5.7396 % avec IWO.

Pour tous les cas simulés de réseau 30 nœuds, le meilleur coût pour l'OPF est obtenu avec la méthode ABC, suivie par le GA, puis soit le PSO soit le GPC, et enfin l'IWO qui donne le coût le plus élevé.

### **4-4-2 Résultats et interprétations pour le réseau 57 nœuds (57 bus) :**

Le réseau 57 nœuds comporte de 80 branches, 57 jeux de barres et 7 générateurs.

Les caractéristiques du réseau 57 nœuds sont données de la figure (4-30)

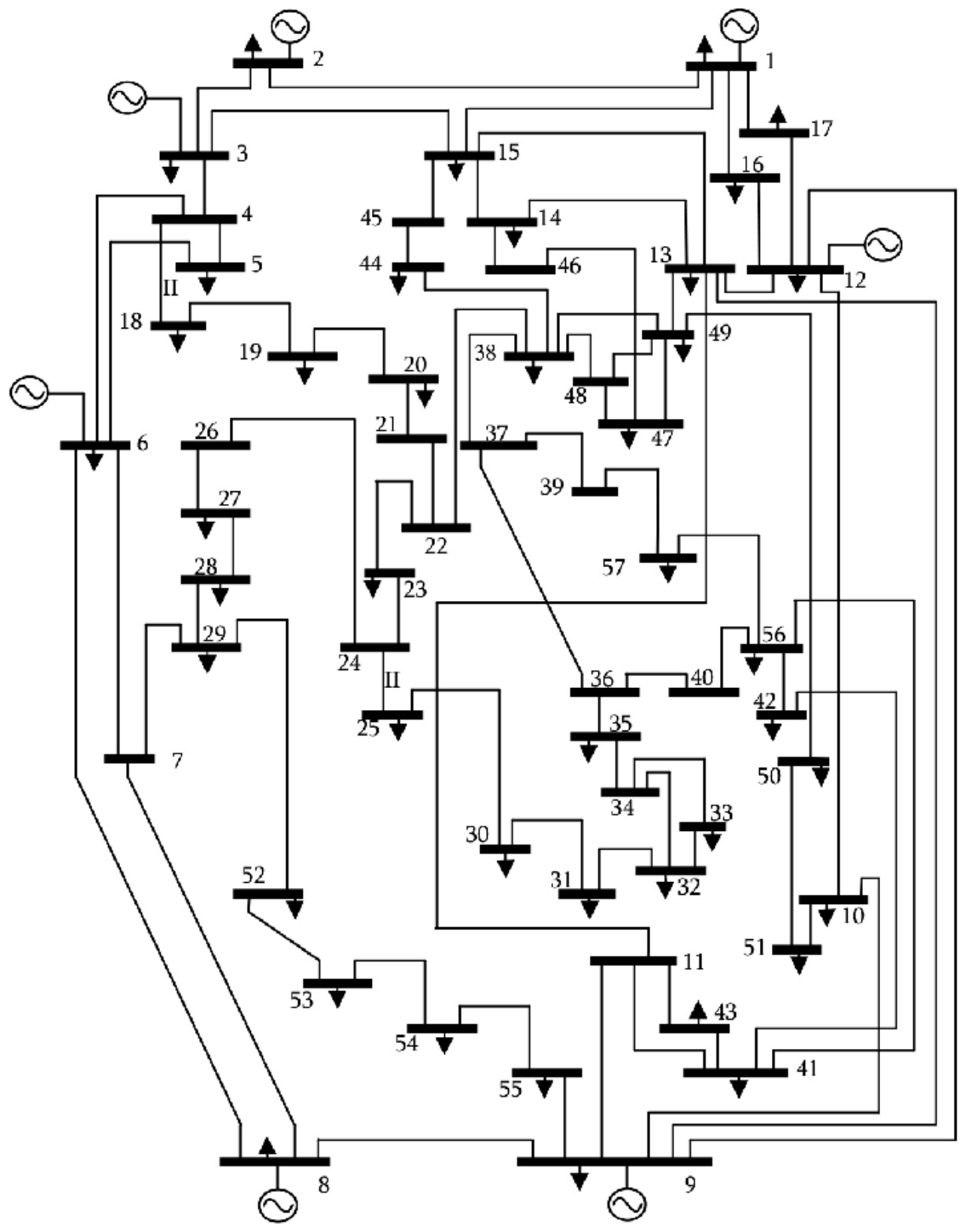


Figure 4-30 : Schéma unifilaire de réseau de 57 jeux de barres

**1er cas : simulation de réseau 57 nœuds sans intégration de générateur solaire PV**  
(avec sept générateurs thermiques) en utilisant les méthodes Métaheuristique le tableau (4-4)  
montre les résultats de l'écoulement de puissance optimal.

	Min	Max	GA	PSO	ABC	IWO	GPC
Pgt1(MW)	0	575.88	163,6196	155,8501	163,9292	191,1587	162,9850
Pgt2(MW)	0	50	49,9959	47,7598	49,9889	46,4801	50
Pgt3(MW)	0	140	57,9157	65,4216	58,0453	45,7293	48,0853
Pgt4(MW)	0	50	49,9994	49,5435	49,9828	49,8372	50
Pgt5(MW)	0	550	450,8769	467,9544	447,5153	470,5254	444,2520
Pgt6(MW)	0	100	99,9735	99,5450	99,9952	90,1212	100
Pgt7(MW)	0	410	393,2200	380,6013	395,9316	373,0465	410
Qgt1(MVars)	-140	200	29,0971	58,7450	39,5531	39,7949	47,7029
Qgt2(MVars)	-17	50	49,4171	24,4867	49,9790	49,6932	36,7153
Qgt3(MVars)	-10	60	32,8102	33,9719	30,8154	30,6671	34,8205
Qgt4(MVars)	-8	25	12,4180	11,5945	6,2294	7,9919	16,6539
Qgt5(MVars)	-140	200	83,1321	100,5406	86,0708	88,3263	87,1462
Qgt6(MVars)	-3	9	8,8052	-2,1704	8,4972	8,6952	-0,7990
Qgt7(MVars)	-150	155	49,0523	42,0764	42,6253	45,2009	41,6026
V1(pu)	0.94	1.06	1,00284	1,0049	1,0073	1,0089	1,0047
V2(pu)	0.94	1.06	0,9998	0,9960	1,0035	1,0043	0,9982
V3(pu)	0.94	1.06	1,0018	1,0022	1,0023	1,0019	1,0005
V6(pu)	0.94	1.06	1,0224	1,0259	1,0192	1,0214	1,0229
V8(pu)	0.94	1.06	1,0408	1,0473	1,04018	1,0425	1,0391
V9(pu)	0.94	1.06	1,0036	1,0028	1,0030	1,0033	0,9992
V12(pu)	0.94	1.06	0,9951	0,9912	0,9942	0,9934	0,9923
cout gt(\$/h)			41882,1813	41910,3649	41891,4500	41961,1078	41903,6874
E(t/h)			172,2283	174,7907	171,6415	179,8103	173,3993
Cout E(\$/h)			3444,5676	3495,8143	3432,8305	3596,2071	3467,9866
Cout T(\$/h)			45326,7490	45406,1792	45324,2806	45557,3149	45371,6741
Pertes (MW)			14,8013	15,8762	14,5886	16,0987	14,5224
VD (pu)			1,1881	1,2161	1,1730	1,1833	1,1857

**Tableau4-4** : solution de l'OPF pour le réseau 57 nœuds sans intégration de générateur PV

## **Interprétations :**

Pour le réseau 57 nœuds sans intégration de PV on observe que :

Les valeurs de puissance active, réactive et les tensions sont dans leurs limites.

L'émission de carbone est élevée et elle est presque la même pour ces méthodes, ce qui conduit à l'augmentation du coût des émissions.

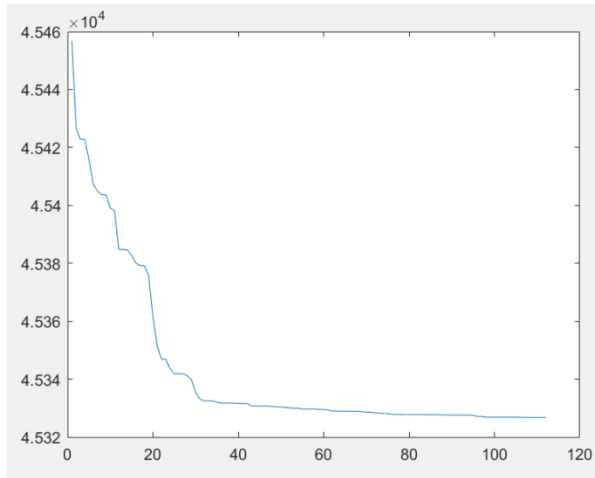
Le coût des générateurs thermiques est significatif, il varie entre 41882,1813 et 41961,1078 \$/h.

Le coût total varie entre les différentes méthodes Métaheuristique : le ABC présente le meilleur coût, à 45324,2806 \$/h, suivi du GA avec une valeur de 45326,7490 \$/h. Les méthodes GPC, PSO et IWO ont respectivement des coûts de 45371,6741 \$/h, 45406,1792\$/h et 45557,3149 \$/h.

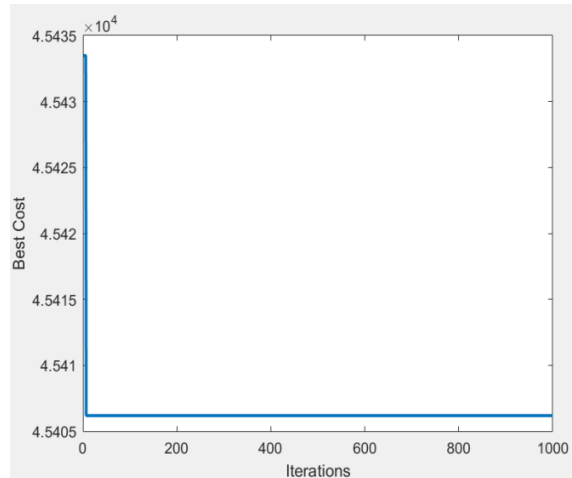
Les pertes de puissance varient entre 14,5224 et 16,0987 MW, tandis que l'écart de tension VD est presque le même.

Le meilleur coût pour l'OPF est obtenu avec la méthode ABC, suivie par GA, GPC, PSO enfin le coût le plus élevé est associé à la méthode IWO.

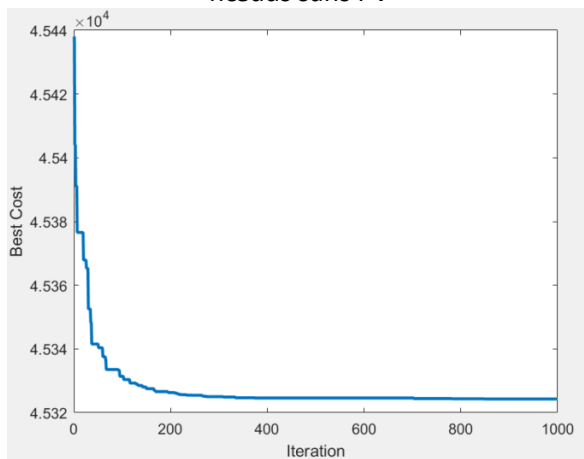
Les figures ci-dessous représentent le meilleur coût pour les différentes méthodes Métaheuristiques :



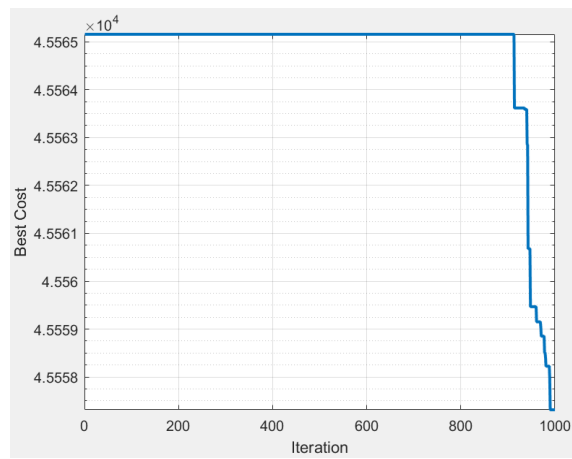
**Figure 4-31** : Meilleur cout pour GA réseau 57 nœuds sans PV



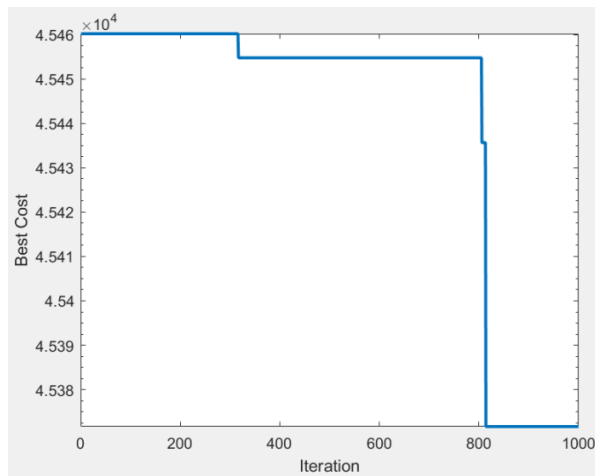
**Figure 4-32** : Meilleur cout pour PSO réseau 57 nœuds sans PV



**Figure4-33** : Meilleur cout pour ABC réseau 57 nœuds sans PV



**Figure4-34** : Meilleur cout pour IWO réseau 57 nœuds sans PV



**Figure 4-35** : Meilleur cout pour GPC réseau 57 nœuds sans PV

Les figures ci-dessous représentent une Comparaison entre les puissances active, les puissances réactive et les différents couts pour chaque algorithme :

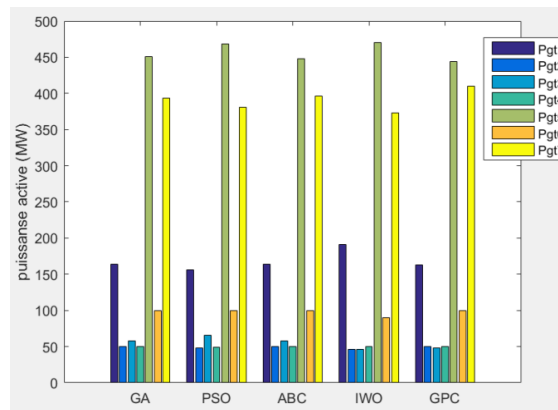


Figure 4-36 : Comparaison entre les puissances actives de réseau 57 nœuds sans PV

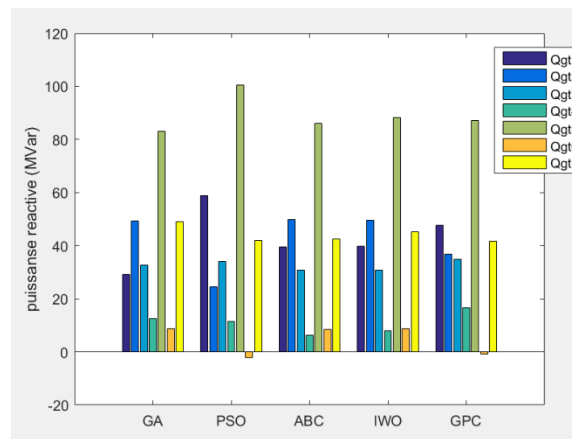


Figure 4-37 : Comparaison entre les puissances réactives de réseau 57 nœuds sans PV

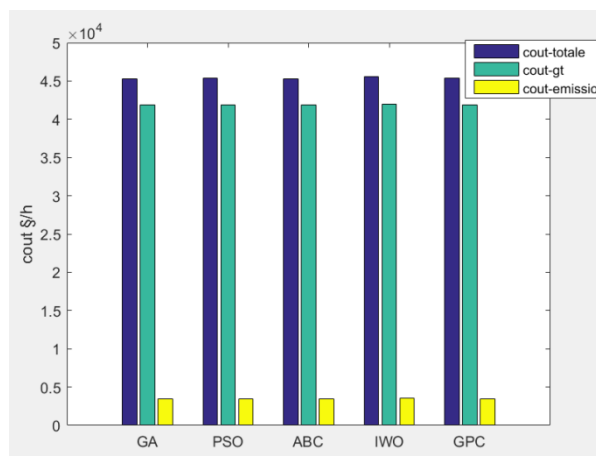


Figure 4-38 : Comparaison entre les différents couts de réseau 57 nœuds sans PV

### Profil des tensions des nœuds de charge : réseau 57 nœuds sans PV



Figure4-39 : tensions des nœuds de charge réseau 57 nœuds sans PV

**Commentaires :**

Toutes les valeurs de puissances actives des générateurs thermiques (Pgt) se situent dans leurs limites, entre les valeurs minimales et maximales, de même que pour les puissances réactives (Qgt).

Le coût des générateurs thermiques (Cout gt) constitue la partie majeure du coût total, tandis que le coût des émissions est le moins élevé.

Les tensions des nœuds de charge ont entre valeur min et max.

**2 ème cas: simulation de réseau 57 nœuds avec intégration de deux générateur solaire PV** au nœud 2 et 6 en plus les cinq générateurs thermiques en utilisant les méthodes métaheuristique le tableau (4-5) montre les résultats de l'écoulement de puissance optimal.

	Min	Max	GA	PSO	ABC	IWO	GPC
Pgt1(MW)	0	575.88	164,6232	171,2887	164,1663	176,5369	144,7679
Pgs1(MW)	0	50	49,9999	49,2784	49,9987	48,7218	50
Pgt2(MW)	0	140	58,4038	50,9400	58,5488	37,3216	40,6336
Pgs2(MW)	0	50	49,9990	49,6750	49,9987	46,9514	50
Pgt3(MW)	0	550	445,9698	453,2507	447,6611	484,9303	471,0743
Pgt4(MW)	0	100	99,9856	94,9164	99,9973	98,1604	100
Pgt5(MW)	0	410	396,3605	396,4638	395,0364	374,9231	410
Qgt1(MVars)	-140	200	34,1837	37,0179	42,5124	36,9690	60,0058
Qsg1(MVars)	-17	50	49,0955	34,9493	49,8204	48,6744	31,6541
Qgt2(MVars)	-10	60	31,0759	44,1386	27,2431	34,0287	37,9394
Qsg2(MVars)	-8	25	7,45689	16,4187	6,6160	10,1286	14,3727
Qgt3(MVars)	-140	200	86,0479	77,7414	85,2213	89,6264	86,5642
Qgt4(MVars)	-3	9	8,21676	7,2299	8,3996	7,2534	3,9148
Qgt5(MVars)	-150	155	47,5773	48,4491	44,0587	46,1866	34,0435
V1(pu)	0.94	1.06	1,0048	1,0022	1,0082	1,0066	1,0065
V2(pu)	0.94	1.06	1,0012	0,9965	1,0039	1,0025	0,9987
V3(pu)	0.94	1.06	1,0014	1,0031	1,0014	1,0018	1,0012
V6(pu)	0.94	1.06	1,0196	1,0229	1,0187	1,0235	1,0234
V8(pu)	0.94	1.06	1,0404	1,0375	1,0396	1,0450	1,0411
V9(pu)	0.94	1.06	1,0034	1,0005	1,0029	1,0047	1,0008
V12(pu)	0.94	1.06	0,9954	0,9937	0,9948	0,9938	0,9905
cout gt(\$/h)			37849,3260	37886,1976	37843,2877	38023,1862	37822,1165
E(t/h)			168.3447	171.8898	168.5959	180.7916	177.7313
Cout E(\$/h)			3366,8952	3437,7963	3371,9181	3615,8326	3554,6276
cout gs(\$/h)			301,9727	298,5399	301,6451	284,5042	300,9675
Cout T(\$/h)			41518,1940	41622,5338	41516,8510	41923,5231	41677,7117



Pertes(MW)			14,5422	15,0133	14,6077	16,7459	15,6758
VD (pu)			1,1761	1,1839	1,1682	1,1980	1,1940

**Tableau 4-5** : solution de l'OPF pour le réseau 30 nœuds avec intégration de 2 PV

**Interprétations :**

Pour le réseau 57 nœuds avec intégration de deux générateur solaire PV on observe que :

Les valeurs de puissance active, réactive et les tensions sont dans leurs limites.

Coût des émissions varie entre 3366,8952 jusqu'à 3615,8326 \$/h.

Le coût des générateurs thermiques est significatif entre 37822,1165 et 38023,1862 \$/h.

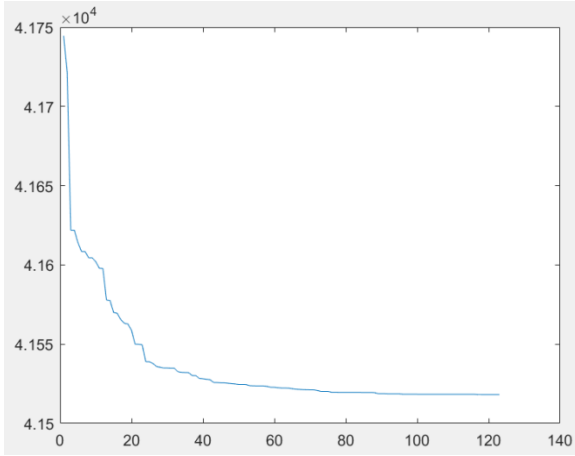
Le coût de générateur solaire PV se situant entre 284,5042 et 301,9727 \$/h.

Le coût total : le ABC présente le meilleur coût, à 41516,8510 \$/h, suivi du GA avec une valeur de 41518,1940 \$/h après PSO, GPC et IWO ont des coûts de 41622,5338 \$/h, 41677,7117 \$/h et 41923,5231 \$/h respectivement.

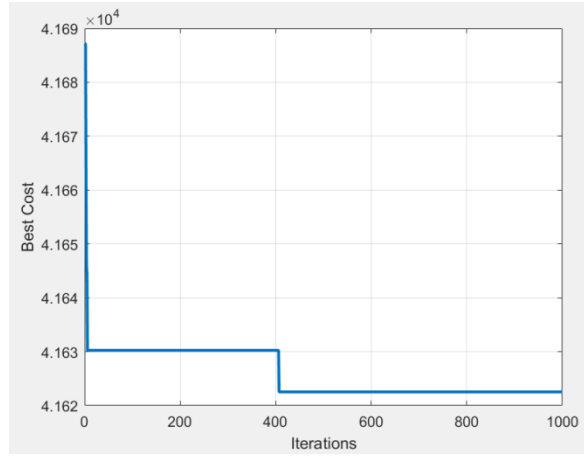
Les pertes de puissance varient entre 14,5422 et 16,7459 MW, tandis que l'écart de tension VD se situe entre 1,1682 et 1,1980 pu.

Le meilleur coût pour l'OPF est obtenu avec la méthode ABC, suivie par GA, PSO, GPC enfin IWO.

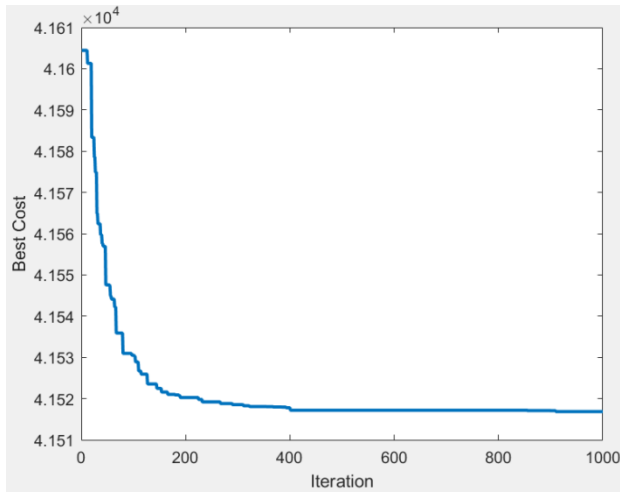
Les figures ci-dessous représentent le meilleur coût pour les différentes méthodes Métaheuristiques :



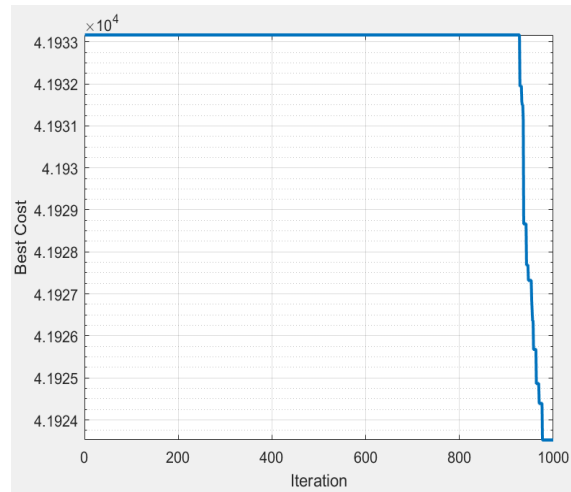
**Figure 4-40** : Meilleur cout pour GA réseau 57 nœuds avec 2 PV



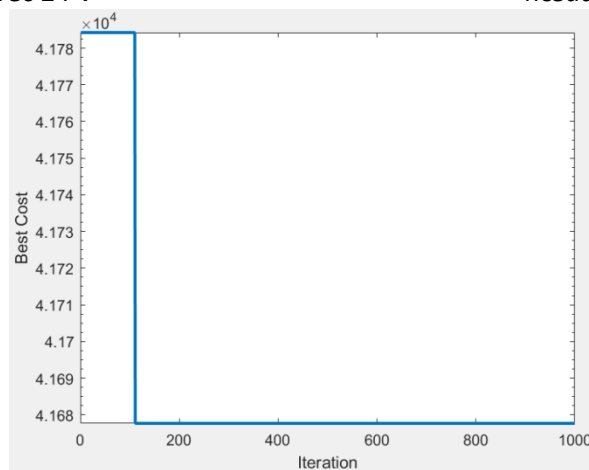
**Figure 4-41** : Meilleur cout pour PSO réseau 57 nœuds avec 2 PV



**Figure 4-42** : Meilleur cout pour ABC réseau 57 nœuds avec 2 PV



**Figure 4-43** : Meilleur cout pour IWO réseau 57 nœuds avec 2 PV



**Figure 4-44** : Meilleur cout pour GPC réseau 57 nœuds avec 2 PV

Les figures ci-dessous représentent une Comparaison entre les puissances active, les puissances réactive et les différents couts pour chaque algorithmme :

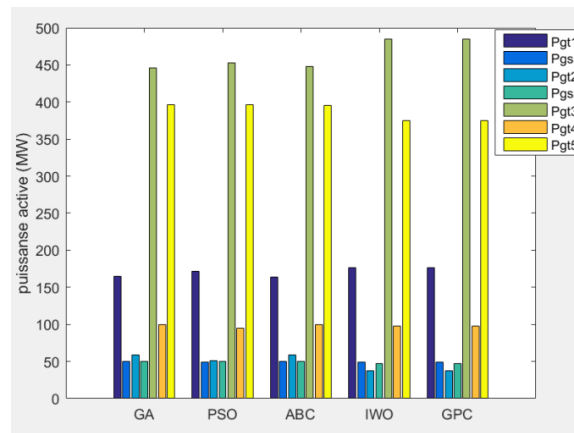


Figure 4-45 : Comparaison entre les puissances actives de réseau 57 nœuds avec 2 PV

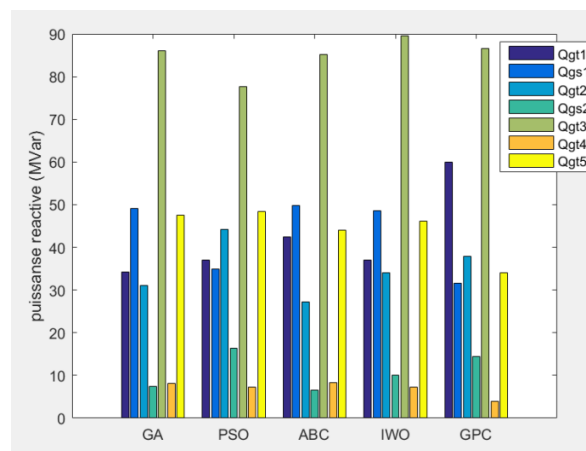


Figure 4-46 : Comparaison entre les puissances réactives de réseau 57 nœuds avec 2 PV

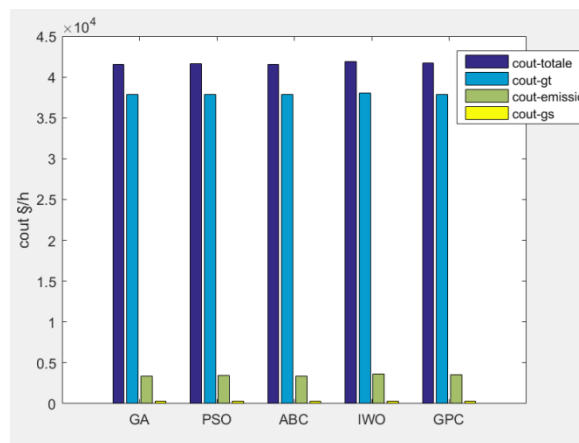


Figure 4-47 : Comparaison entre les différents couts de réseau 57 nœuds avec 2 PV

### Profil des tensions des nœuds de charge : réseau 57 nœuds avec 2 PV



Figure 4-48 : tensions des nœuds de charge réseau 57 nœuds avec 2 PV

### **Commentaires :**

Toutes les valeurs de puissances actives des générateurs thermiques ( $P_{gt}$ ) et des générateurs solaires PV ( $P_{gs}$ ) se situent dans leurs limites, entre les valeurs minimales et maximales, de même que pour les puissances réactives des générateurs thermiques ( $Q_{gt}$ ) et des générateurs solaires PV ( $Q_{gs}$ ).

Le coût des générateurs thermiques (Coût  $gt$ ) constitue la partie majeure du coût total, après le coût des émissions et en dernier le coût des générateurs solaires PV.

Les tensions des nœuds de charge ont entre valeur min et max.

### **Comparaison entre les cas de réseau 57 nœuds :**

Avec l'intégration des générateurs solaire PV on remarque que :

Le coût des générateurs thermiques diminue par rapport au réseau sans intégration de PV, tandis que le coût des générateurs solaires PV augmente. Les valeurs des émissions de carbone diminuent, ce qui réduit le coût des émissions.

Les pertes de puissance sont quasiment identiques, et l'écart de tension VD reste également presque le même pour les différents cas.

Le coût total diminue avec l'intégration des PV de 3600 à 3800 \$/h pour les différents méthodes métaheuristiques utilisées.

Avec l'intégration de deux générateurs solaire PV, la réduction du coût total est de : 8.40% avec GA et ABC ,8.33% avec PSO, 8.14% avec GPC et enfin avec IWO une diminution de 7.97 qui est la moins efficace.

Pour tous les cas simulés de réseau 57 nœuds, le meilleur coût pour l'OPF est obtenu avec la méthode ABC, suivie par le GA, puis soit le PSO soit le GPC, et enfin l'IWO qui donne le coût le plus élevé.

## **4-5 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons utilisé le logiciel MATPOWER pour simuler deux réseaux électriques, l'un de 30 nœuds et l'autre de 57 nœuds, pour une étude sur le problème de l'écoulement de puissance optimal visant à minimiser le coût de production.

Le cout total de production peut être amélioré d'environ 4 % avec l'intégration d'un générateur solaire photovoltaïque pour le réseau 30 nœuds et environ de 10% avec l'intégration de deux générateurs solaires photovoltaïques pour le même réseau. Tandis que le réseau 57 nœuds peut être amélioré de 8 % avec l'intégration de deux générateurs solaires photovoltaïques.

Pour les méthodes métaheuristiques utilisées, le meilleur coût pour l'OPF est obtenu avec la méthode ABC, suivie par le GA, puis soit le PSO soit le GPC, et enfin l'IWO qui donne le coût le plus élevé.

D'après les résultats obtenus, nous avons constaté que l'intégration de générateurs photovoltaïques apporte des bénéfices économiques très importants. Les résultats se sont avérés très satisfaisants, ce qui encourage l'intégration accrue des énergies renouvelables pour remplacer les combustibles fossiles et produire l'électricité de manière plus propre et durable.

# Conclusion Générale

L'importance de la préservation de l'environnement dans les temps modernes a conduit à une augmentation significative de l'intérêt des chercheurs pour les sources d'énergie renouvelables. La demande d'énergie humaine, notamment en électricité, ne cesse d'augmenter, ce qui représente des défis majeurs pour la planification des réseaux électriques.

L'idée d'écoulement de puissance optimal (OPF) est donc fondamentale à différents niveaux de planification. Grâce à l'OPF, le système énergétique peut fonctionner efficacement et au coût le plus bas possible.

Dans notre mémoire on propose une approche de solution au problème (OPF) avec une puissance solaire photovoltaïque stochastique dans le réseau. L'incertitudes de source renouvelable (photovoltaïque) intermittente est modélisée par fonctions de densité de probabilité (lognormal). Le coût de production incorporant toutes les sources est optimisé et la variation du coût de production avec le changement des coefficients de coût de l'énergie photovoltaïque est étudiée. La violation des contraintes peut entraîner des pertes excessives alors le fonctionnement du réseau dans des limites définies est donc une condition préalable à un fonctionnement sûr et correct.

Nous avons considéré deux cas d'étude : simulation de réseau test 30-nœuds et réseau 57-nœuds avec et sans intégration d'énergie photovoltaïque pour minimiser le cout, les résultats sont donnés dans le chapitre (IV). La solution se fait par 5 méthodes (algorithmes génétiques(GA), les algorithmes d'optimisation par essaims particulaires(PSO), les algorithmes des herbes invasive(IWO), les algorithmes des colonies des abeilles artificielles(ABC) et algorithme de construction des pyramides de Gizeh(GPC). Ces méthodes sont programmées sur MATLAB/MATPAWOR.

Le cout total de production peut être amélioré d'environ 4 % avec l'intégration d'un générateur solaire photovoltaïque pour le réseau 30 nœuds et environ de 10% avec l'intégration de deux générateurs solaires photovoltaïques pour le même réseau. Tandis que le réseau 57 nœuds peut être amélioré de 8 % avec l'intégration de deux générateurs solaires photovoltaïques.



Les résultats de notre étude montrent que les bénéfices économiques apportés par le solaire photovoltaïque sont très importants, ce qui encourage vivement à amplifier les énergies renouvelables pour une production électrique plus propre et durable à long terme, en substitution des énergies fossiles.

Donc les ressources non renouvelables étant limitées, donc l'énergie durable est l'élément clé du développement durable.

Nos propositions des recherches futures sont :

- ❖ La planification hydro-thermique intégrée à l'OPF avec diverses sources d'énergie renouvelables pourrait être utilisée pour produire de l'électricité de manière économique et sans pollution.
- ❖ L'intégration possible de petites génératrices hydroélectriques à débit variable, de stockage sous forme de batteries ou d'hydroélectricité pompée dans le réseau avec un grand nombre de bus.
- ❖ Un modèle précis de générateurs à induction doublement alimentés pour les éoliennes, les dispositifs FACTS peuvent également être incorporés pour une étude détaillée.

# **Références bibliographiques**

- [1] M. R. AlRashidi, Student Member, IEEE, and M. E. El-Hawary, Fellow, IEEE, "Hybrid Particle Swarm Optimization Approach for Solving the Discrete OPF Problem Considering the Valve Loading Effects", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL.22, NO.4, NOVEMBER 2007.
- [2] J. D. Weber and T. J. Overbye, "An individual welfare maximization algorithm for electricity markets," IEEE Trans. Power Syst., vol. 17, no. 3, pp. 590–596, Aug. 2002.
- [3] Y. He, Y. H. Song, and X. F. Wang, "Bidding strategies based on bid sensitivities in generation auction markets", Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 149, no. 1, pp. 21–26, 2002.
- [4] A. Naserbegi, M. Aghaie a, Z. Nourani, "Optimal design of a concentrated solar power plant with a thermal energy storage system using the Downhill Simplex Method", 2024.
- [5] Chandan Paula, Tushnik Sarkara, Susanta Duttaa, Provas Kumar Roy, "Integration of optimal power flow with combined heat and power dispatch of renewable wind energy-based power system using chaotic driving training-based optimization",2024.
- [6] Partha P. Biswasa, P.N. Suganthana, Gehan A.J. Amaratunga, "Optimal power flow solutions incorporating stochastic wind and solar power", 2017.
- [7] Souhil MOUASSA, " Optimisation de l'écoulement de puissance par une méthode métaheuristique (technique des abeilles) en présence d'une source renouvelable (éolienne) et des dispositifs FACTS. ", UNIVERSITE Ferhat ABBAS SETIF - (ALGERIE), Mémoire de Magister le 19/06/2012
- [8] A.J. Covarrubias, " Planification de l'expansion des systèmes électriques article",1979.
- [9] Ngoffe Stève PERABI, " Résolution du problème d'engagement d'unités de production d'énergie électrique, de dispatching économique et environnemental sélectif par la méthode des couloirs d'observations ", Université de Douala, BP 8698 Douala, Cameroun article 2015.
- [10] Hristiyan KANCHEV, Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable " Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain ", THESE le 24 janvier 2014.
- [11] Zobeidi Messaoud, "Amélioration de la sécurité des systèmes électriques à travers l'approche de sensibilité pour l'emplacement optimal des dispositifs FACTS", Thèse Doctorat LMD en Electrotechnique 27/05/ 2021.

[12] Aissaoui Ahmed, “ PLANIFICATION DES RESEAUX ELECTRIQUES DE DISTRIBUTION POUR UNE PRESENCE MASSIVE DE LA GENERATION D’ENERGIE DISPERSEE”, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, Thèse, le 13 / 12 / 2016.

[13] TOUMI Ilham, “Contribution à l’amélioration de performance d’une chaine énergétique hybride (éolienne/ photovoltaïque) basée sur des techniques d’intelligence artificielle Université Kasdi Merbah”, Ouargla, Thèse 17/05 /2023.

[14] M FATAH Amir, “Etude du fonctionnement des centres de production dans un système de marché libre de l’énergie électrique”, UNIVERSITE DE BATNA, Thèse 2011/2012.

[15] HELLEL EL Kadi, “ Fiabilité des systèmes énergétiques multi-sources. ”, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, THESE DE DOCTORAT 2019.

[16] ABDELHAMID LILIA “ Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens Evaluation de l’Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement”, Université Hadj Lakhdar de Batna, 26/04/201, thèse doctorat en sciences en électrotechnique.

[17] Dris Mida, “ Contribution à la Modélisation d’un Système de Production d’Energie Electrique Hybride « Eolien – Photovoltaïque » ”, Université Mohamed Khider – Biskra, Thèse, le 10/04/2019.

[18] Amédédjihundé Hypolite J. HOUNNOU, “Dimensionnement optimal d’un système hybride hydroélectrique-photovoltaïque-stockage pour une alimentation rurale isolée”, l’Université Bourgogne Franche-Comté, Thèse de Doctorat le 09 décembre 2019.

[19] Mr. EL MAKRINI Aboubakr, “ AMÉLIORATION DE L’INTÉGRATION DE L’ÉNERGIE ÉOLIENNE AU RÉSEAU ÉLECTRIQUE DE TRANSPORT MAROCAIN ”, THÈSE DE DOCTORAT, université sidi Mohamed ben Abdellah.

[20] Olivier RICHARDOT, “ Réglage Coordonné de Tension dans les Réseaux de Distribution à l'aide de la Production Décentralisée”, institut national polytechnique de Grenoble thèse, le 10 octobre 2006

[21] Amir Ahmidi , “Participation de parcs de production éolienne au réglage de la tension et de la puissance réactive dans les réseaux électriques”, ECOLE CENTRALE DE LILLE ,THESE le 16 décembre 2010 .

[22] Stefan STERPU, “ Contrôle de performances de producteurs indépendants pour une meilleure sécurité des réseaux électriques”, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, T H E S E le 12 Juillet 2005.

- [23] Ye Wang, “ Evaluation de la Performance des Réglages de Fréquence des Eoliennes à l’Echelle du Système Electrique : Application à un Cas Insulaire”, DOCTORAT DELIVRE PAR L’ECOLE CENTRALE DE LILLE ,21 Jan 2013.
- [24] M. YANN GHANTY, “ Etude du lien entre la fréquence et les puissances actives pour le dimensionnement d'un microréseau alternatif îloté avec sources d'énergie renouvelables”, DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE ,20 décembre 2018.
- [25] SAYAH Samir, “ Application de l’Intelligence Artificielle pour le Fonctionnement Optimal des Systèmes Electriques ”, Doctorat en Sciences Université Ferhat Abbas — Sétif ,2018.
- [26] Kamel SAOUDI, “ Stabilisateurs intelligents des systèmes électro-énergétiques ”, UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF1, Thèse de Doctorat le 02 novembre 2014.
- [27] BERROUK Fateh , “REPARTITION OPTIMALE DES FLUX ENERGETIQUES ET IMPACT SUR LA PERFORMANCE D’UN SYSTEME ELETRIQUE HT ”, Université 8 Mai 1945 Guelma, THÈSE DE DOCTORAT ,2018/2019.
- [28] K. Kety, “ Modélisation et simulation d’un générateur photovoltaïque : Cas du module polycristallin Ecoline LX-260P installé au dispensaire de Sévagan (Togo) ”, article le 25 Décembre 2016.
- [29] Saad Saoud Merwan, “ Optimisation de la gestion de l’énergie photovoltaïque utilisée dans une zone agricole”, THESE UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA 2016/2017.
- [30] M. Abid, M. Belazzoug, “Optimal power flow of thermal-wind solar power system using enhanced Kepler optimization algorithm: Case study of a large-scale practical power system”,Article 2024.
- [31] JULIE SLIWAK, “ Résolution de problèmes d’optimisation pour les réseaux de transport d’électricité de grande taille avec des méthodes de programmation semi-définie positive”, UNIVERSITÉ SORBONNE PARIS NORD, le 22 juin 2021.
- [32] Amel ZERIGUI RÉPARTITION, “ OPTIMALE DE LA PRODUCTION ÉLECTRIQUE AVEC UNE CONTRAINTE DE STABILITÉ TRANSITOIRE ÉTABLIE PAR UNE APPROCHE STATISTIQUE ”, école de technologie supérieure université du Québec thèse, LE 2 FÉVRIER 2015.
- [33] DJEDIDI IMENE, “ Optimisation Des Performances Du Réseau Électrique de Distribution Par Des Méthodes Évolutionnaires”, Université Mohamed Khider Biskra, doctorat LMD en génie électrique, 2022/2023.

- [34] A.E. Chaiba, H.R.E.H. Bouchekaraa,b, R. Mehasnia, M.A. Abidoc , “Optimal power flow with emission and non-smooth cost functions using backtracking search optimization algorithm”, article 2016.
- [35] Partha P. Biswasa, P.N. Suganthana, Gehan A.J. Amaratungab, “Optimal power flow solutions incorporating stochastic wind and solar power”, article 2017.
- [36] Warid Warid, Hashim Hizam, “Optimal Power Flow using the Jaya Algorithm”, Malaysia, 2016.
- [37] Dorigo M., Caro G. D, “The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic”, in D. Corne, M. Dorigo, F. Glover (eds), *New Ideas in Optimization*, McGraw-HillLondon, pp. 11-32, 1999.
- [38] M.S. Osman a, M.A. Abo-Sinna, “A solution to the optimal power flow using genetic algorithm”, Egypt,2004.
- [39] Voratas Kachitvichyanukul, “Comparison of Three Evolutionary Algorithms: GA, PSO, and DE”, Thailand,2012.
- [40] Moustafa Alzantot, “Episode 1 — Genetic Algorithm for Reinforcement Learning”, 2017.
- [41] Rui Qi, Baogang Hu PSOTS, “A Particle Swarm Optimization Toolbox in Scilab ”, Chine, 2009.
- [42] Urvashi Chauhan a,b , Himanshu Chhabra, “Chaos inspired invasive weed optimization algorithm for parameter estimation of solar PV models”, 2024.
- [43] Mehrabian, Lucas, “Novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization”,*Ecological Informatics*, 2006.
- [44] Mojgan misaghi, Mahdi yaghoobi, “Improved invasive weed optimization algorithm (IWO) based on chaos theory for optimal design of PID controller”,*University of Islamic azad, Mashhad, Iran*, 2018.
- [45] Zhuofan Li, Xiaoqian Liu, Yingjun Zhang, “Learning high-order fuzzy cognitive maps via multimodal artificial bee colony algorithm and nearest-better clustering: Applications on multivariate time series prediction”,2024.
- [46] Xing Li, Shaoping Zhang, Peng Shao, “Discrete artificial bee colony algorithm with fixed neighborhood search for traveling salesman problem”,2024.
- [47] Sasan Harifi et al, Giza Pyramids, “Construction: an ancient-inspired metaheuristic algorithm for optimization”,2022.

[48] Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo-Sánchez, “MATPOWER-A MATLAB Power System Simulation Package: User’s Manual”, Articles, December 1997.

# **Annexes**



**Annexe A :**

Nœuds	Type	Pd (MW)	Qd( MVars)	Vm (pu)	Vmax(pu)	Vmin(pu)
1	3	0	0	1	1.05	0.95
2	2	21.7	12.7	1	1.1	0.95
3	1	2.4	1.2	1	1.05	0.95
4	1	7.6	1.6	1	1.05	0.95
5	1	0	0	1	1.05	0.95
6	1	0	0	1	1.05	0.95
7	1	22.8	10.9	1	1.05	0.95
8	1	30	30	1	1.05	0.95
9	1	0	0	1	1.05	0.95
10	1	5.8	2	1	1.05	0.95
11	1	0	0	1	1.05	0.95
12	1	11.2	7.5	1	1.05	0.95
13	2	0	0	1	1.1	0.95
14	1	6.2	1.6	1	1.05	0.95
15	1	8.2	2.5	1	1.05	0.95
16	1	3.5	1.8	1	1.05	0.95
17	1	9	5.8	1	1.05	0.95
18	1	3.2	0.9	1	1.05	0.95
19	1	9.5	3.4	1	1.05	0.95
20	1	2.2	0.7	1	1.05	0.95
21	1	17.5	11.2	1	1.05	0.95
22	2	0	0	1	1.1	0.95
23	2	3.2	1.6	1	1.1	0.95
24	1	8.7	6.7	1	1.05	0.95
25	1	0	0	1	1.05	0.95
26	1	3.5	2.3	1	1.05	0.95
27	2	0	0	1	1.1	0.95
28	1	0	0	1	1.05	0.95
29	1	2.4	0.9	1	1.05	0.95
30	1	10.6	1.9	1	1.05	0.95

**Tableau A-1 :** Paramètre des nœuds du réseau 30 nœuds

fbus	tbus	r (pu)	x (pu)	b (pu)	rateA (MW)	rateB (MVars)	rateC (MVA)	Angle (rad)
1	2	0.02	0.06	0.03	130	130	130	0
1	3	0.05	0.19	0.02	130	130	130	0
2	4	0.06	0.17	0.02	65	65	65	0
3	4	0.01	0.04	0	130	130	130	0
2	5	0.05	0.2	0.02	130	130	130	0
2	6	0.06	0.18	0.02	65	65	65	0
4	6	0.01	0.04	0	90	90	90	0
5	7	0.05	0.12	0.01	70	70	70	0
6	7	0.03	0.08	0.01	130	130	130	0
6	8	0.01	0.04	0	32	32	32	0
6	9	0	0.21	0	65	65	65	0
6	10	0	0.56	0	32	32	32	0
9	11	0	0.21	0	65	65	65	0
9	10	0	0.11	0	65	65	65	0
4	12	0	0.26	0	65	65	65	0
12	13	0	0.14	0	65	65	65	0
12	14	0.12	0.26	0	32	32	32	0
12	15	0.07	0.13	0	32	32	32	0
12	16	0.09	0.2	0	32	32	32	0
14	15	0.22	0.2	0	16	16	16	0
16	17	0.08	0.19	0	16	16	16	0
15	18	0.11	0.22	0	16	16	16	0
18	19	0.06	0.13	0	16	16	16	0
19	20	0.03	0.07	0	32	32	32	0
10	20	0.09	0.21	0	32	32	32	0
10	17	0.03	0.08	0	32	32	32	0
10	21	0.03	0.07	0	32	32	32	0
10	22	0.07	0.15	0	32	32	32	0
21	22	0.01	0.02	0	32	32	32	0
15	23	0.1	0.2	0	16	16	16	0
22	24	0.12	0.18	0	16	16	16	0
23	24	0.13	0.27	0	16	16	16	0
24	25	0.19	0.33	0	16	16	16	0
25	26	0.25	0.38	0	16	16	16	0
25	27	0.11	0.21	0	16	16	16	0
28	27	0	0.4	0	65	65	65	0
27	29	0.22	0.42	0	16	16	16	0
27	30	0.32	0.6	0	16	16	16	0
29	39	0.24	0.45	0	16	16	16	0
8	28	0.06	0.2	0.02	32	32	32	0
6	28	0.2	0.06	0.01	32	32	32	0

**Tableau A-2 : Paramètre des branches du réseau 30 nœuds**

Générateurs	Bus	Pg (Mw)	Qg (MVars)	Vg(pu)	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Qmax (MVars)	Qmin (MVars)
G1	1	23.54	0	1	80	0	150	-20
G2	2	60.97	0	1	80	0	60	-20
G3	22	21.59	0	1	50	0	62.5	-15
G4	27	26.91	0	1	55	0	48.7	-15
G5	23	19.2	0	1	30	0	40	-10
G6	13	37	0	1	40	0	44.7	-15

**Tableau A-3 :** Paramètres des générateurs du réseau 30 nœuds

Générateurs	Bus	a	b	c	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\omega$	$\mu$
G1	1	0	2	0.02	4.091	-5.554	6.49	2.00E-04	2.857
G2	2	0	1.75	0.0175	2.543	-6.047	5.638	5.00E-04	3.333
G3	22	0	1	0.0625	4.258	-5.094	4.586	1.00E-06	8
G4	27	0	3.25	0.00834	5.326	-3.55	3.38	2.00E-03	2
G5	23	0	3	0.025	4.258	-5.094	4.586	1.00E-06	8
G6	13	0	3	0.025	6.131	-5.555	5.151	1.00E-05	6.667

**Tableau A-4 :** Coefficients de coût des générateurs thermiques et d'émission du réseau 30 nœuds

**Annexe B :**

Nœuds	Type	Pd (MW)	Qd( MVars)	Vm (pu)	Vmax(pu)	Vmin(pu)
1	3	55	17	1.04	1.06	0.94
2	2	3	88	1.01	1.06	0.94
3	2	41	21	0.985	1.06	0.94
4	1	0	0	0.981	1.06	0.94
5	1	13	4	0.976	1.06	0.94
6	2	75	2	0.98	1.06	0.94
7	1	0	0	0.984	1.06	0.94
8	2	150	22	1.005	1.06	0.94
9	2	121	26	0.98	1.06	0.94
10	1	5	2	0.986	1.06	0.94
11	1	0	0	0.974	1.06	0.94
12	2	377	24	1.015	1.06	0.94
13	1	18	2.3	0.979	1.06	0.94
14	1	10.5	5.3	0.97	1.06	0.94
15	1	22	5	0.988	1.06	0.94
16	1	43	3	1.013	1.06	0.94
17	1	42	8	1.017	1.06	0.94
18	1	27.2	9.8	1.001	1.06	0.94
19	1	3.3	0.6	0.97	1.06	0.94
28	1	4.6	2.3	0.997	1.06	0.94
29	1	17	2.6	1.01	1.06	0.94

20	1	2.3	1	0.964	1.06	0.94
21	1	0	0	1.008	1.06	0.94
22	1	0	0	1.01	1.06	0.94
23	1	6.3	2.1	1.008	1.06	0.94
24	1	0	0	0.999	1.06	0.94
25	1	6.3	3.2	0.982	1.06	0.94
26	1	0	0	0.959	1.06	0.94
27	1	9.3	0.5	0.982	1.06	0.94
30	1	3.6	1.8	0.962	1.06	0.94
31	1	5.8	2.9	0.936	1.06	0.94
32	1	1.6	0.8	0.949	1.06	0.94
33	1	3.8	1.9	0.947	1.06	0.94
34	1	0	0	0.959	1.06	0.94
35	1	6	3	0.966	1.06	0.94
36	1	0	0	0.976	1.06	0.94
37	1	0	0	0.985	1.06	0.94
38	1	14	7	1.013	1.06	0.94
39	1	0	0	0.983	1.06	0.94
40	1	0	0	0.973	1.06	0.94
41	1	6.3	3	0.996	1.06	0.94
42	1	7.1	4.4	0.966	1.06	0.94
43	1	2	1	1.01	1.06	0.94
44	1	12	1.8	1.017	1.06	0.94
45	1	0	0	1.036	1.06	0.94
46	1	0	0	1.05	1.06	0.94
47	1	29.7	11.6	1.033	1.06	0.94
48	1	0	0	1.027	1.06	0.94
49	1	18	8.5	1.036	1.06	0.94
50	1	21	10.5	1.023	1.06	0.94
51	1	18	5.3	1.052	1.06	0.94
52	1	4.9	2.2	0.98	1.06	0.94
53	1	20	10	0.971	1.06	0.94
54	1	4.1	1.4	0.996	1.06	0.94
55	1	6.8	3.4	1.031	1.06	0.94
56	1	7.6	2.2	0.968	1.06	0.94
57	1	6.7	2	0.965	1.06	0.94

**Tableau B-1** : Paramètre des nœuds du réseau 57 nœuds

fbus	tbus	r (pu)	x (pu)	b (pu)	rateA (MW)	rateB (MVars)	rateC (MVa)	Angle (rad)
1	2	0.0083	0.028	0.129	0	0	0	0
2	3	0.0298	0.085	0.0818	0	0	0	0
3	4	0.0112	0.0366	0.038	0	0	0	0
4	5	0.0625	0.132	0.0225	0	0	0	0

4	6	0.043	0.148	0.0348	0	0	0	0
6	7	0.02	0.102	0.0276	0	0	0	0
6	8	0.0339	0.173	0.047	0	0	0	0
8	9	0.0099	0.0505	0.0548	0	0	0	0
9	10	0.0369	0.1659	0.044	0	0	0	0
9	11	0.0258	0.0848	0.0218	0	0	0	0
9	12	0.0648	0.295	0.0772	0	0	0	0
9	13	0.0481	0.158	0.0406	0	0	0	0
13	14	0.0132	0.0443	0.011	0	0	0	0
13	15	0.0269	0.0869	0.023	0	0	0	0
1	15	0.0178	0.091	0.0988	0	0	0	0
1	16	0.0454	0.206	0.0546	0	0	0	0
1	17	0.0238	0.108	0.0286	0	0	0	0
3	15	0.162	0.053	0.0544	0	0	0	0
4	18	0	0.555	0	0	0	0	0
4	18	0	0.43	0	0	0	0	0
5	6	0.0302	0.0641	0.0124	0	0	0	0
7	8	0.0139	0.0712	0.0194	0	0	0	0
10	12	0.0277	0.1262	0.0328	0	0	0	0
11	13	0.0223	0.0732	0.0188	0	0	0	0
12	13	0.0178	0.058	0.0604	0	0	0	0
12	16	0.018	0.0813	0.0216	0	0	0	0
12	17	0.0373	0.179	0.0476	0	0	0	0
14	15	0.0171	0.0547	0.0148	0	0	0	0
18	19	0.461	0.685	0	0	0	0	0
19	20	0.283	0.434	0	0	0	0	0
21	20	0	0.7767	0	0	0	0	0
21	22	0.0736	0.117	0	0	0	0	0
22	23	0.099	0.0152	0	0	0	0	0
23	24	0.166	0.256	0.0084	0	0	0	0
24	25	1.188	0	0	0	0	0	0
24	25	0	1.23	0	0	0	0	0
24	26	0	0.0473	0	0	0	0	0
26	27	0.165	0.254	0	0	0	0	0
27	28	0.0618	0.0954	0	0	0	0	0
28	29	0.0418	0.0584	0	0	0	0	0
7	29	0	0.0648	0	0	0	0	0
25	30	0.135	0.202	0	0	0	0	0
30	32	0.326	0.497	0	0	0	0	0
31	32	0.507	0.755	0	0	0	0	0
32	33	0.0392	0.036	0	0	0	0	0
34	32	0	0.0953	0	0	0	0	0
34	35	0.052	0.078	0.0032	0	0	0	0
35	36	0.043	0.0537	0.0016	0	0	0	0
36	37	0.029	0.0366	0	0	0	0	0
37	38	0.0651	0.1009	0.002	0	0	0	0

37	39	0.0239	0.0379	0	0	0	0	0
36	40	0.03	0.0466	0	0	0	0	0
22	38	0.0192	0.0295	0	0	0	0	0
11	41	0	0.749	0	0	0	0	0
41	42	0.207	0.352	0	0	0	0	0
41	43	0	0.412	0	0	0	0	0
38	44	0.0289	0.0585	0.002	0	0	0	0
15	45	0	0.1042	0	0	0	0	0
14	46	0	0.0735	0	0	0	0	0
46	47	0.023	0.068	0.0032	0	0	0	0
47	48	0.0182	0.0233	0	0	0	0	0
48	49	0.0834	0.129	0.0048	0	0	0	0
49	50	0.0801	0.128	0	0	0	0	0
50	51	0.1386	0.22	0	0	0	0	0
10	51	0	0.0712	0	0	0	0	0
13	49	0	0.191	0	0	0	0	0
29	52	0.1442	0.187	0	0	0	0	0
52	53	0.0762	0.0984	0	0	0	0	0
53	54	0.1878	0.232	0	0	0	0	0
54	55	0.1732	0.2265	0	0	0	0	0
11	43	0	0.153	0	0	0	0	0
44	45	0.0624	0.1242	0.004	0	0	0	0
40	56	0	1.195	0	0	0	0	0
56	41	0.553	0.549	0	0	0	0	0
56	42	0.2125	0.354	0	0	0	0	0
39	57	0	1.355	0	0	0	0	0
57	56	0.174	0.26	0	0	0	0	0
38	49	0.115	0.177	0.003	0	0	0	0
38	48	0.0312	0.0482	0	0	0	0	0
9	55	0	0.1205	0	0	0	0	0

**Tableau B-2 : Paramètre des branches du réseau 57 nœuds**

Générateurs	Bus	Pg (Mw)	Qg (MVars)	Vg(pu)	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Qmax (MVars)	Qmin (MVars)
G1	1	128.9	-16.1	1.04	575.88	0	200	-140
G2	2	0	-0.8	1.01	50	0	50	-17
G3	3	40	-1	0.985	140	0	60	-10
G4	6	0	0.8	0.98	50	0	25	-8
G5	8	450	62.1	1.005	550	0	200	-140
G6	9	0	2.2	0.98	100	0	9	-3
G7	12	310	128.5	1.015	410	0	155	-150

**Tableau B-3 : Paramètres des générateurs du réseau 57 nœuds**

Générateurs	Bus	a	b	c	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\omega$	$\mu$
G1	1	0	20	0.0775	4.091	-5.554	6.49	2.00E-04	2.86E-01
G2	2	0	40	0.01	2.543	-6.047	5.638	5.00E-04	3.33E-01
G3	3	0	20	0.25	6.131	-5.555	5.151	1.00E-05	6.67E-01
G4	6	0	40	0.01	3.491	-5.754	6.39	3.00E-04	2.66E-01
G5	8	0	20	0.0222	4.258	- 5.094	4.586	1.00E-06	8.00E-01
G6	9	0	40	0.01	2.754	-5.847	5.238	4.00E-04	2.88E-01
G7	12	0	20	0.0322	5.326	-3.555	3.38	2.00 E-03	2.00E-01

**Tableau B-4** : Coefficients de coût des générateurs thermiques et d'émission du réseau 57 nœuds