

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 عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université de Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الإلكترونيات

Département d'Électrotechnique



Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique

Domaine : Électrotechnique

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commande Électrique

Thème

Etude technico-économique de l'installation d'une ferme photovoltaïque dans la région de Béchar-Algérie

Présenté par :

1) Melle Oneiz Feryal

Devant le jury :

Dr Younes Khadidja

MCB

UAT.B.B (Ain Temouchent)

Présidente

Dr Messafeur Rajaa

MCB

UAT.B.B (Ain Temouchent)

Examinatrice

Dr ADJOU DJ Labiba

MCB

UAT.B.B (Ain Temouchent)

Encadrante

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

En premier lieu, je remercie chaleureusement ma directrice de mémoire, Docteur ADJOU DJ Labiba, pour son encadrement rigoureux, sa disponibilité et ses conseils avisés tout au long de ce travail. Son expertise et son soutien ont été déterminants dans l'aboutissement de cette recherche.

Mes remerciements s'adressent aussi aux membres du jury, pour l'attention portée à ce travail et pour leurs remarques constructives qui ont permis d'améliorer la qualité de ce mémoire.

Je souhaite également remercier l'ensemble du corps enseignant du Département d'électrotechnique de l'université Belhadj Bouchaib-Ain Temouchent, pour la qualité de l'enseignement dispensé et pour leur accompagnement tout au long de mon parcours académique.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À ma famille, source inépuisable d'amour et de motivation.

À ma mère, pour sa patience et ses encouragements.

À mon père, pour sa sagesse et son soutien indéfectible.

À mes frères et sœurs, pour leur présence réconfortante.

Merci d'avoir toujours été là pour moi, que dieu vous protège et vous accorde une longue vie.

Résumé

Actuellement nous avons un réseau électrique fiable, à tel point qu'un incident sur l'alimentation est ressenti par le citoyen comme une agression personnelle. Beaucoup de personnes raisonnent comme si l'électricité était accumulée en de grands réservoirs et que la manœuvre d'un interrupteur équivalait à l'ouverture d'un robinet.

La réalité est bien différente, dans la mesure où l'électricité ne se stock pas, du moins couronnât alternatif comme le sont nos réseaux, et qu'il faut donc en permanence assurer l'équilibre entre la production et la consommation. L'augmentation fatale de la charge durant les dernières années a obligé l'état d'investir dans le domaine d'électricité soit par l'injection des nouvelles centrales comme la plus grande centrale de l'ouest de TARGA ou la construction des nouvelles lignes tels que la ligne de SIDI BOSSIDI- SAIDA et NAMA-BECHAR malgré ca le problème de la charge persiste toujours ce qui oblige la SONELGAZ de trouver d'autre solutions comme le délestage ou améliorer la puissance transitée , ainsi que la répartition économique des puissances.

Pour cela on s'intéressera à l'étude du réseau Algérien, on essaiera de trouver les problèmes rencontrés liés à la répartition économique des puissances dans la pratique. Par la suite, on essaiera de trouver des solutions on s'orientera vers la réalisation des installations des énergies renouvelables en particulier l'énergie solaire photovoltaïque.

Abstract

Currently we have a reliable power grid, so much so that an incident on the power supply is felt by the citizen as a personal aggression. Many people reason as if electricity was accumulated in large tanks and that the operation of a switch was equivalent to the opening of a tap. The reality is very different, since electricity is not stored, at least in AC current as our networks are, and therefore we must constantly ensure the balance between production and consumption. The fatal increase in load over the last few years has forced the state to invest in the electricity sector either by injecting new power plants such as TARGA'S largest powerplant in the west or building new lines, which persists, which forces sonelgaz to find other solutions such as loadshedding or to improve the transited power as well as the economic distribution of power.

For this we will focus on the study of the Algerien network, we will try to find the problems encountered related to the economic distribution of powers in practice. Subsequently, we will try to find solutions and we will try to find solutions and we will move towards the realization of the current renewable energy especially photovoltaic energy.

ملخص

حاليا لدينا شبكة كهرباء موثوقة، لدرجة ان وقوع أي حادث في التغذية الكهربائية يمكن ان يعتبره المواطن كاعتداء شخصي، كثير من الناس يفكرون وكان الكهرباء مخزنه في مخازن كبيرة وان عملية القاطع الكهربائي تعادل عملية فتح الصنوبر، ولكن الواقع مختلف جدا، لأنه لا يمكن تخزين الكهرباء، على الاقل بالنسبة للتيار المتردد كما هو حال شبكاتنا. وبالتالي، يجب ان يكون هناك توازن دائم بين الإنتاج والاستهلاك. قامت الزيادة الكبيرة للحمولة خلال السنوات الأخيرة بالزام الدولة بالاستثمار في مجال الكهرباء اما عن طريق دمج مراكز جديدة لتوليد الكهرباء مثل أكبر مركز توليد الكهرباء في الغرب تارفة او انشاء خطوط جديدة مثل خط سيدي بوسيدي-سعيدة-النعامه وشارف على الرغم من ذلك مشكلة الحمله مازالت مستمرة مما يجبر سونلغاز على إيجاد حلول أخرى مثل درف الحمله او تحسين القدرة الكهربائية العابرة وكذلك التوزيع لهذا سوف نركز على دراسة الشبكة الجزائرية، سوف نحاول العثور على المشاكل المتعلقة الاقتصادي للقدرة الكهربائية. بالتوزيع الاقتصادي للقدرة الكهربائية في الجانب العملي، بعد ذلك سوف نحاول ان نجد حلول، سوف نتوجه نحو تحقيق تركيبات الطاقات المتجددة الحالية وبالأخص الطاقة الشمسية الكهروضوئية

Liste des figures :

Figure I.1: Architecture générale des réseaux électriques [8].....	4
Figure I.2: Vue globale du réseau électrique [13].....	5
Figure I.3: Différents topologies des réseaux électriques (a) réseau maillé, (b) réseau bouclé, (c) réseau RADIAL, (d) réseau arborescent [15].....	7
Figure I.4: Conducteur usuels [18].....	8
Figure I.5: Câble de garde à fibres optique incorporées [18].....	9
Figure I.6: Transformateur de puissance dans un réseau électrique [18].....	10
Figure I.7: Schéma d'un réseaux électriques [19]	10
Figure I.8: Les Smart Grids [24].....	11
Figure I.9: Réseau Intelligent [26].....	12
Figure I.10 : Petits réseaux électriques [27].....	14
Figure I.11 : Energie renouvelable [5].....	15
Figure I.12: Changement structural attends dans le système énergétique apporté par l'utilisation accrue d'outil numérique [29].....	16
Figure I.13: Réseau a Nœuds [34].....	16
Figure I.14: Changement structural attend dans le système énergétique apporté par l'utilisation accrue d'outil numérique [26].....	17
Figure I.15: Réseau à nœuds [49].....	19
Figure I.16:Algorithme de résolution du problème de la répartition de charges.....	21
Figure II.1: Elément d'une éolienne [49].....	27
Figure II.2 : La géothermie [49].....	28
Figure II.3 : Bilan de cycle biomasse [51].....	28
Figure II.4 : Energie Marine [3].....	29
Figure II.5 : Energie solaire [4].....	29
Figure II.6 : Chaine de conversion de photovoltaïque [5].....	30
Figure II.7 : La cellule au champ photovoltaïque [6].....	32
Figure II.8 : Composantes de cellule photovoltaïque [7].....	33
Figure II.9 : Modélisation d'une cellule PV [8].....	33

Liste des figures

Figure II.10 : Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau électrique [66]	34
Figure II.11 : Schéma principe d'un système PV autonome [68].....	35
Figure II.12 : Centrale solaire photovoltaïque [68].....	36
Figure II.13 : Principe du froid solaire [7].	36
Figure II.14 : Pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale en TWh [10].....	37
Figure II.15 : L'irradiation solaire annuelle mondiale [11].....	38
Figure II.16 : Le gisement solaire en Algérie [12].....	38
Figure III.1 : Interface graphique de PSAT.....	47
Figure III.2 : Fenêtre d'accueil de PSAT [80].....	47
Figure III.3 : Réseau Algérien 114 nœuds [82].....	50
Figure III.4 : Le réseau Algérien inséré dans PSAT.....	51
Figure III.5 : Flux de puissance active du réseau Algérien.....	52
Figure III.6 : Flux de puissance réactive du réseau Algérien.....	52
Figure III.7 : Pertes Actives dans les lignes de transmission de réseau Algérien.....	53
Figure III.8 : Perte réactive dans les lignes de transmission de réseau Algérien.....	54
Figure III.9 : Amplitude de tensions en (p.u) des nœuds du réseau Algérien.....	54
Figure III.10 : Profil de tensions du réseau Algérien en présence de la ferme SPV (50MW) à BECHAR (p.u).....	57
Figure III.11 : Pertes actives avant et après l'insertion de la ferme PV (50 MW) à BECHAR.....	58
Figure III.12 : Perte réactive avant et après l'insertion de la ferme SPV (50MW) à BECHAR.....	59
Figure III.13 : Estimation des coûts du kilowattheure de la centrale de production renouvelable pour le site étudié (BECHAR).....	62
Figure III.14 : L'apport positif de cette installation sur le réseau Algérien (Productions thermique totales obtenues).....	63
Figure III.15 : L'apport positif de cette installation sur le réseau Algérien (Pertes totales obtenues).....	63

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Types des nœuds de réseau électrique [35]	19
Tableau II.1: Les différentes source renouvelables employées à des fins énergétique [16].....	26
Tableau II.2 : Le taux d'ensoleillement pour région d'Algérie [17].....	39
Tableau II.3 : Types de panneaux solaires.....	44
Tableau III.1: Données des nœuds de régulation du réseau Algérien [4].....	50
Tableau III. 2: Résultats des puissances générées et des pertes globales du réseau Algérien.....	52
Tableau III.3 : Résultats des différents emplacements du générateur photovoltaïque PHV (25MW).....	56
Tableau III.4 : Pertes actives et réactives totales du réseau pour différentes capacités de la ferme SPV.....	57
Tableau III.5 : Amplitudes de tension avant et après l'insertion de la ferme SPV (50MW) à BECHAR.....	58
Tableau III.6 : Pertes de transmissions actives et réactives avant et après l'insertion de la ferme SPV (50MW) à BECHAR.....	59
Tableau III.7 : Puissances actives optimales des générateurs en présence de GSPV..	65

Liste des symboles et abréviations

PF	Power Flow (écoulement de puissance)
OPF	Optimal Power Flow (écoulement de puissance optimal)
PSAT	Power System Analysis Toolbox
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IOT	Internet of Things (Internet des Objets)
ER	Energie Renouvelable
PVC	Present Value of Costs
UCE	Unit Cost of Electricity
GSPV	Générateur Solaire Photovoltaïque
P_{Gi}	Puissance active générée par le générateur thermique au nœud i
Q_{Gi} nœud i	Puissance réactive générée par le générateur thermique au nœud i
P_{Di}	Puissance active demandé par la charge au nœud i
Q_{Di}	Puissance réactive demandée par la charge au nœud i
E_c	Le rayonnement solaire [W/ m^2]
$T_{réf}$	La température de référence de panneaux de $25C^\circ$
T_j	La température de jonction des cellules
P_1	Représente de dispersion caractéristique des panneaux
N_{mod}	Le nombre de module
P_{mod}	La puissance d'un module
$N_{branche}$	Le nombre des onduleurs
P_{ond}	La puissance d'un onduleur
C_{mode}	Coût des modules PV
C_{onde}	Coût des onduleurs
$C_{batteries}$	Coût des batteries
BOS	Coût annexe
Inv	Investissement initial
Coût d'exp & maint	Coût d'exploitation et maintenance

Liste des symboles et abréviations

Coût de rem main – d’œuvre	Coût de remplacement Coût des travailleurs nécessaires pour l’installation
C_{pv} [€/KWC]	Le coût des modules PV
P_{rated} [W]	La puissance nominale des onduleurs solaires
C_{inv} [€ / KWC]	Le coût associe à la construction et à l’installation des composants de la centrales photovoltaïque
BOS [€/KWC]	Le coût des composants de l’équilibre du système.
C_{land} [€ /km ² –an ²]	Coût du terrain et de la surface nécessaire à l’installation de la centrale PV
n [années] photovoltaïque.	La durée de vie opérationnelle de la centrale photovoltaïque.
C_c	Coût total du système (en euros).
N_i	Nombre d’installations ou d’unités.
N_s	Nombre de modules en série.
N_p	Nombre de chaînes en parallèle.
P_{mstc}	Puissance d’un module (en watts crête – WC).
$C_{c\&i}$	Coût de câblage et installation (€/kW)
N	Nombre d’unités de terrain utilisées.
M_{plant} , [€/KWC]	Le Coût de maintenance de la centrale photovoltaïque
$P_{plantnom}$	Puissance nominale de la centrale photovoltaïque
E_{plant} [MWh]	l’énergie totale produit par centrale photovoltaïque sur sa durée de vie opérationnelle.
C_c	Coût initial d’investissement total du système (en €).
C_m	Coût total de maintenance sur toute la durée de vie (en €)
C_{rep}	Coût de remplacement d’équipements
$P_{electricity}$ [€/MWh]	Le prix de l’électricité pour la durée de vie opérationnelle de la centrale photovoltaïque.
$E_{planttot}$ [MWh].	Production annuelle d’énergie de la centrale (en kWh ou MWh).
n	Durée de vie ou nombre d’années de fonctionnement de la centrale.
$S_{arrayfinal}$	Surface occupée par les modules photovoltaïques (en m ²).

Liste des symboles et abréviations

$land$	Surface totale de terrain disponible ou utilisée (en m ²).
$E_{planttot}$ [MWH] année.	L'énergie totale produite par la centrale PV pendant une année.
G_t	Irradiation solaire globale reçue sur le plan des modules pendant la même période (en kWh/m ²)
E_{total} kWh)	Énergie totale produite par l'installation sur une période (en kWh)
C_{omr}	Les coûts annuels
R	Le taux d'intérêt
I	Le taux d'inflation
T	La durée de vie de l'installation
AEP Production)	La production annuelle d'énergie cumulée (Annual Energy Production)
$P_{e,moy}$	La puissance moyenne fournie par le générateur
$F_i(P_{Gti})$	Coût du combustible du générateur thermique
P_{Gti} nœud	La puissance active générée par le générateur thermique au nœud
$F_i(P_{Gsi})$	Coût linéaire du générateur solaire photovoltaïque
P_{Gsi} au nœud	Représente la puissance active du générateur photovoltaïque au nœud
d_{si} photovoltaïque	Représente le coefficient de coût direct du générateur photovoltaïque

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles et abréviations

Table des matières

Introduction générale

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

I.1 Introduction	3
I.2 Description du réseau électrique.....	3
I.3 Généralité sur l'architecture de réseaux électrique.....	4
I.4 Hiérarchisation du réseau électrique.....	5
I.4.1 Production.....	5
I.4.2 Transport.....	6
I.4.3 Distribution.....	6
I.4.4 Répartition	7
I.5 Blackouts	7
I.6 Niveaux de tension	7
I.7 Lignes électriques	8
I.7.1 Types de lignes.....	9
I.7.2 Composantes d'une ligne.....	9
I.7.2.1 Supports	9
I.7.2.2 Conducteurs.....	9
I.7.2.3 Câble de garde.....	10
I.7.2.4 Isolateur.....	10
I.7.3 Poste de transformation (transformateur).....	11
I.8 Topologies des réseaux électriques.....	11
I.8.1 Réseaux radiaux	12
I.8.2 Réseaux Bouclé	12

Table des matières

I.8.3 Réseaux Maillé.....	13
I.9 Actualité de réseau électrique.....	13
I.9.1 État actuel de l'infrastructure électrique.....	13
I.9.2 Défis pour l'infrastructure électrique.....	13
I.9.3 Maintenance des réseaux	14
I.10 Technologies à venir dans le développement de réseau électrique	14
I.10.1 Réseaux intelligents.....	14
I.10.2 Petits réseaux électriques.....	15
I.10.3 Energie renouvelable.....	16
I.10.4 Systèmes de stockage d'énergie.....	16
I.10.5 Avantages de la mise en œuvre de ces techniques.....	17
I.11 Fondements et facteurs physiques qui distinguent les réseaux électriques	17
I.11.1 Équilibre parfait entre l'offre et la demande (production et consommation).....	17
I.11.2 La difficulté et le coût élevé du stockage de l'électricité.....	18
I.11.3 Direction du déplacement et transport de l'électricité.....	18
I.12 Problème de l'écoulement de puissance	18
I.12.1 Formulation des équations d'écoulement de puissance	18
I.12.2 Types de nœuds des réseaux électriques.....	19
I.12.3 Objectifs de l'écoulement de puissance.....	19
I.12.4 Méthodes de résolution de l'écoulement de puissance	20
I.13 Ecoulement de puissance optimale.....	22
I.13.1 Objectives d'écoulement de puissance optimale.....	23
I.13.2 Défis d'écoulement de puissance optimal.....	23
I.13.3 Domaines d'application de l'écoulement de puissance optimal.....	23
I.14 Conclusion.....	24

Chapitre II : Energies Renouvelables

II.1 Introduction.....	25
II.2 Différents source renouvelable.....	25
II.3 Production d'énergie électrique	26
II.4 Différent types d'énergie renouvelable	27

Table des matières

II .4.1 Energie éolienne	27
II .4.2 Géothermie	27
II .4.3 Biomasse	28
II .4.4 Energie Marine.....	29
II .4.5 Energie solaire	29
II .4.5.1 Définition	29
II .4.5.2 Avantages.....	30
II 4.5.3 Inconvénients	31
II .4.5.4 Principe physique de l'énergie solaire	31
II .4.5.5 Types de l'énergie solaire	31
II .4.5.6 Générateur photovoltaïque GPV.....	32
II.4.5.7 Cellule photovoltaïque.....	32
II .5 Application des systèmes photovoltaïque.....	34
II .5.1 Systèmes raccordés au réseau (connecté au réseau)	34
II .5.1.1 Avantages	34
II .5.2 Systèmes autonomes (isolée)	34
II .5.3 Système injection ou réseau centralisé (centrale solaire photovoltaïque).35	
II.6 Utilisation de l'énergie solaire thermique	36
II.6.1 Chauffage solaire des locaux	36
II.6.2 Refroidissement solaire	36
II.6.3 Chauffe –eau solaires collectifs (CESC).....	37
II.7 Energies renouvelables dans l'Algérie.....	37
II.8 Gisement solaire	37
II.8.1 Potentiel solaire mondiale.....	37
II.8.2 Potentiel solaire en Algérie	38
II.9 Etude économique	39
II.9.1 Evaluation du cout d'investissement initial	39
II .10 Etude économique de l'investissement	40
II .10.1 Calcul du cout total de la central PV (C_c)	40
II.10.1.1 Calcul du cout de maintenance de la centrale photovoltaïque pendant sa durée de vie (C_m)	41

Table des matières

II.10.1.2 Calcul du cout de remplacement (C_{rep})	41
II.10.1.3 Calcul du cout actualisé de l'énergie (LCOE).....	41
II.10.1.4 Revenus Bruts (R_{gross})	42
II .10.1.5 Calcul de paramètres de d'évaluation	42
II 10.1.5.1 Taux de couverture du sol (GCR)	42
II .10.1.5.2 Performance ratio (PR)	43
II .10.1.5.3 Facteur de capacité (CF)	43
II .10.1.5.4 Rendement spécifique ($yield_{sp}$)	43
II .11 Types de Panneaux Solaires	43
II .12 Glossaire des Innovations Technologiques dans le Domaine de l'Électricité...	44
II .13 Conclusion	45
<i>Chapitre III : Simulations et résultats</i>	
III.1 Introduction	46
III.2 Logiciel PSAT.....	46
III.2.1 Méthodes d'analyse	48
III.2.2 Avantage de PSAT.....	48
III.2.3 Utilisation de PSAT pour un projet photovoltaïque à Béchar.....	48
III.3 Étude de la centrale photovoltaïque à Béchar	48
III.3.1 Présentation de la région de Béchar	48
III.3.2 Potentiel solaire de Béchar	48
III.3.3 Projets photovoltaïques existants	49
III.4 Présentation du réseau Algérien.....	49
III.4.1 Résultats de simulation sur le réseau Algérien.....	50
III.4.2 Analyse et discussion.....	53
III.5 Insertion du générateur photovoltaïque au réseau Algérien.....	55
III.6 Etude technico-économique de l'installation de la centrale photovoltaïque à Bechar.....	60
III.6.1 Coûts de production de la ferme photovoltaïque à BECHAR.....	61
III.6.2 Apport positif de l'installation de la centrale photovoltaïque à Béchar...	62

Table des matières

III.6.3 Profit économique de l'installation de la centrale photovoltaïque à Béchar.....	64
III.7 Conclusion .	66
Conclusion générale	67
Références	

Introduction générale

L'énergie électrique fait partie de notre quotidien, nous l'utilisons chaque jour pour le déplacement, le chauffage, la climatisation, l'éclairage, le fonctionnement de toutes les machines et les appareils qui meublent notre vie quotidienne.

Les énergies renouvelables sont des énergies primaires inépuisables à très long terme. Elles sont issues directement de phénomènes naturels, réguliers ou constants (vent, soleil, marées). Les énergies renouvelables sont d'actualité et d'inscrivent dans les démarches du développement durable et de préservations de l'environnement. De nos jours le monde est engagé dans ce domaine. Aujourd'hui on sait utiliser l'énergie du soleil pour la production de l'électricité (panneaux photovoltaïque, solaire thermodynamique).

L'intégration de l'énergie renouvelable dans les réseaux électrique est un enjeu majeur pour la transition écologique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'énergie renouvelables, telle que l'énergie solaire offrent une alternative durable à l'énergie fossile et contribuent à une réduction significative des émissions de CO₂. Cependant, leur intégration dans les réseaux électriques pose des défis techniques et réglementaires importants.

Les objectifs de réduction des émissions de CO₂ et de transition écologique nécessitent une augmentation significative de la part de l'énergie renouvelable dans le réseau électrique. Selon les projections, les énergies renouvelables devaient représenter plus de 50% de l'approvisionnement en électricité dans l'Union européenne d'ici 2030. Cependant, cette augmentation possède défis pour les réseaux électriques, notamment en termes de flexibilité, de gestion de la variabilité de la source d'énergie et de sécurité d'approvisionnement.

L'objectif de cette étude est de contribuer à l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique en explorant les solutions technique pour améliorer l'écoulement d'énergie électrique.

Pour atteindre ces objectifs, cette étude utilisera une approche combinée de recherche littéraire et de simulation. Cette étude contribuera à l'avancement de la connaissance sur l'intégration de l'énergie renouvelable dans les réseaux électrique, en proposant des solutions techniques pour améliorer le flux de puissance et le cout de production.

Ce manuscrit comporte trois chapitres.

- Le premier chapitre donnera une vision globale sur la topologie du réseau électrique, qui reste toujours d'actualité. Nous présenterons les problèmes de l'écoulement de puissance et l'OPF et leurs applications dans le réseau électrique
- Dans le deuxième chapitre, nous commencerons par donner une version globale sur les énergies renouvelable et un aperçu sur la production à partir des énergies renouvelables au niveau mondiale et en Algérie. Nous présenterons les avantage de ER sur coté sociale, envirommentale et économique. Nous expliquerons la modélisation de l'énergie photovoltaïque.
- Dans le dernier chapitre nous expliquerons le logiciel PSAT/MATLAB, qui est utilisé pour l'analyse des réseaux dans nos travaux. Finalement, nous

Introduction générale

présenterons et discuterons le résultat de l'écoulement de puissance et l'OPF avec l'insertion des centrales photovoltaïque dans le réseau Algérien réel.

- Ce chapitre présentera une synthèse des différents résultats, afin de proposer une solution technico-économique basée sur l'énergie renouvelable, qui peut être réalisable dans la pratique, puisque nous avons un réseau réel.
- Cette solution vise à renforcer la qualité d'alimentation, minimiser le cout de production et résoudre tous les problèmes du réseau électrique Algérien.
- Enfin, une conclusion termine ce mémoire.

Chapitre I
Généralités sur les réseaux
électriques

I.1 Introduction

Aujourd'hui, l'électricité joue un rôle très important dans notre vie quotidienne et chaque pays considère cette énergie comme un moyen indispensable pour son développement social et économique. Chaque moindre problème d'origine électrique influe considérablement sur la continuité des activités économiques [1].

Ce chapitre donne une vision générale sur la topologie des réseaux électriques, qui est toujours en évolution comme la production d'énergie électrique en conventionnel et à la basse des énergies renouvelables, dans le monde et en Algérie. Il s'intéresse aussi à la structure des réseaux de transport et distribution, la qualité du transport électrique et la problématique rencontrée par les réseaux électriques tels que le déséquilibre entre la production et la consommation, surtout avec la forte croissance de la demande électrique durant ces dernières années.

I.2 Description du réseau électrique

Le réseau électrique est l'ensemble des éléments permettant d'acheminer l'énergie électrique des centrales de production vers le consommateur d'électricité.

Il est constitué de lignes électriques exploitées à différent niveaux de tension, connectées entre elle avec des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir et de faire passer l'électricité d'une tension à une autre grâce aux transformateurs.

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production –transport –consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble [2].

Les interconnexions internationales des réseaux électriques deviennent de plus en plus importantes dans le monde accompagné d'un intérêt grandissant pour la puissance électrique [3].

Actuellement, parce que tout l'appareillage du réseau électrique produit et distribue le courant alternatif triphasé. Les transformateurs augmentant la tension produit par les alternateurs tout en diminuant le courant électrique, cela permet de réduire les pertes puissance active par effet joule.

L'augmentation de la consommation d'énergie électrique a engendré une forte demande sur le système de distribution, ou la préoccupation sont non seulement asservir plus de client, mais fournir l'équipement qui exige plus d'attention aux variations des tensions et moins d'interruptions de service [4].

Le système électrique peut être séparé en trois fonctions principales (figure I.1) :

- La production
- Le transport
- La distribution

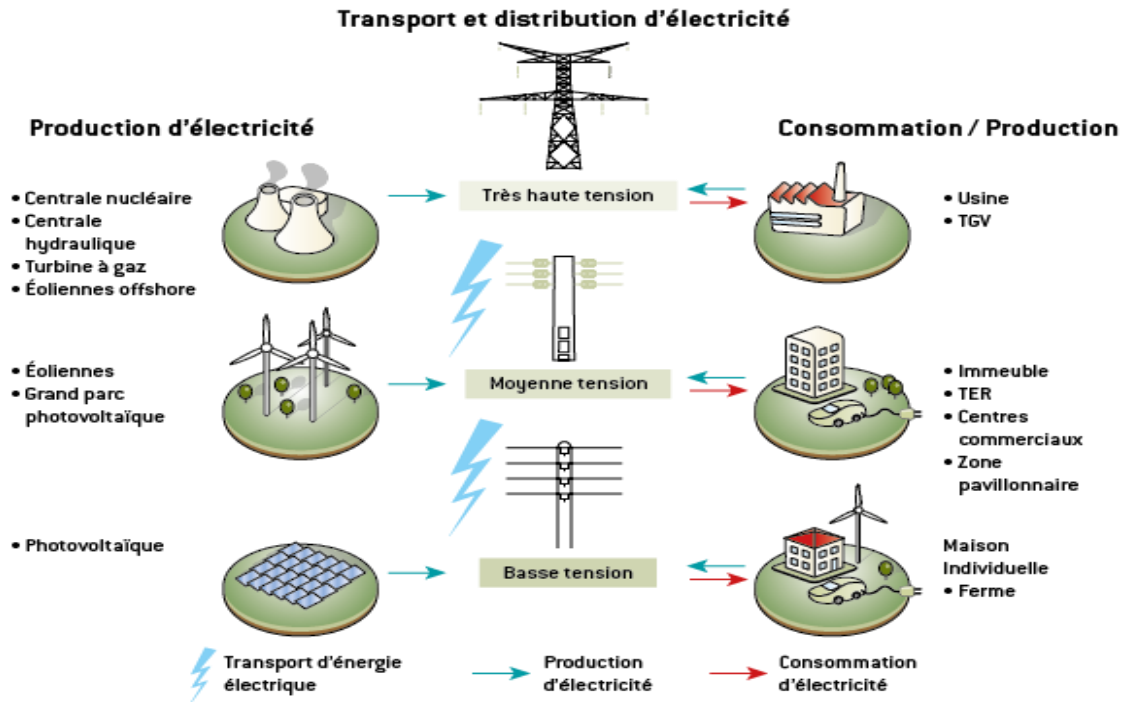


Figure I.1 : Réseau électrique simplifié [5].

Un réseau électrique est un système maillé mettant en œuvre :

- **des nœuds (ou postes) ou sont raccordés** : les centrales (centre de production), les charges (consommation) et les lignes électrique (élément du réseau).
- **des branches (ou lignes électrique)** : qui interconnectent les nœuds
- Le maillage du réseau améliore la disponibilité de l'alimentation en énergie aux usagers, la stabilité et la qualité du produit du électrique car les deux dépendent de la puissance de court-circuit, laquelle augmente avec le maillage ou plus exactement avec le nombre et la puissance des centres de production installés et raccordés [6].

I.3 Généralité sur l'architecture de réseaux électrique

Le réseau de transport et d'interconnexion à très haute tension (400KV, 225KV) forme un ensemble maillé sur lequel sont raccordés les grandes centrales (>300MW). Il est complété par un réseau de répartition à haute tension (60KV à 150KV), exploité soit en bouclé fermée, soit le plus souvent en boucle ouvert et sur lequel se raccordent des centrale électrique de moindre puissance.

Ainsi que le grand utilisateur industriel (<100MVA). On trouve ensuite un réseau de distribution (de20KVà400V), desservant la clientèle (petites et moyenne entreprises, commerce, secteur résidentiel.....etc.), à travers des postes de répartition.

Ce réseau de distribution est généralement de structure radiale, éventuellement boucler dans les zones urbaines pour assurer la continuité de service. L'alimentation

d'une grande agglomération se fait en général par une boucle à 380KV ou 225KV alimentée par le réseau d'interconnexion.

Sur laquelle sont raccordés des postes abaisseurs vers le réseau de répartition, sur ce réseau de répartition sont branchés des postes abaisseurs (postes de répartition) vers le réseau de distribution (15KV à 20KV), qui est bouclé ou boucler et enfin le réseau basse tension de structure radiale alimentent le consommateur (en triphasé ou en monophasé).

Un schéma simplifié de l'architecture générale du réseau électrique est illustré dans la figure (I.2) [7].

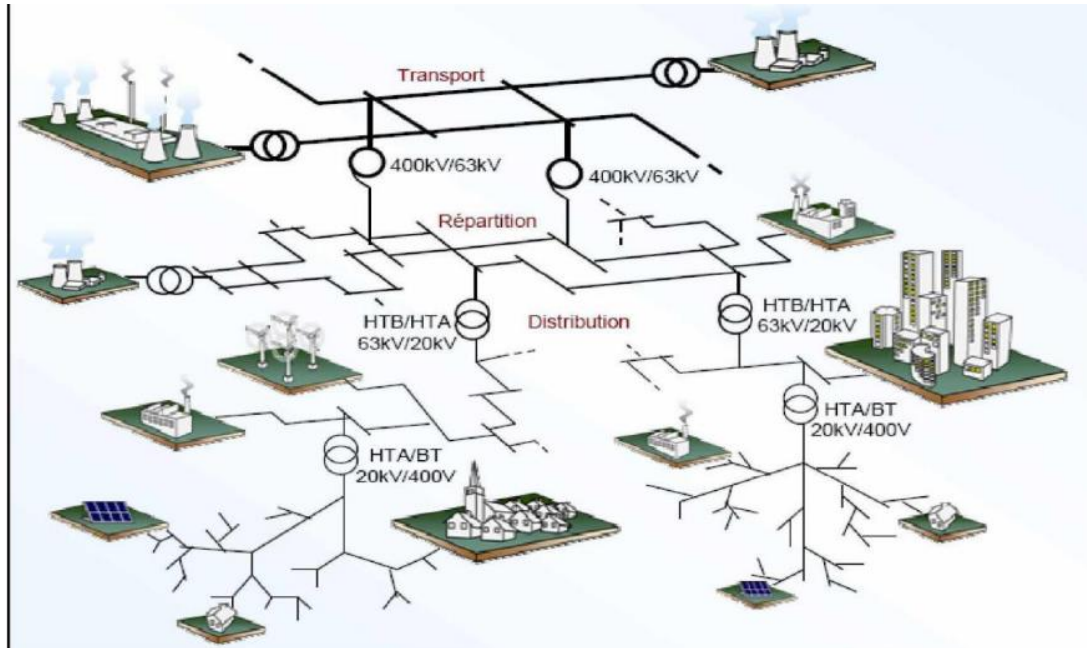


Figure I.2 : Architecture générale des réseaux électriques [8].

I.4 Hiérarchisation du réseau électrique

La Figure (I.3) illustre une vue globale du réseau électrique. On distingue quatre niveaux :

- ✓ Production.
- ✓ Transport.
- ✓ Répartition.
- ✓ Distribution.

I.4.1 Production

Les grands groupes de production d'énergie électrique sont en général basés sur l'alternateur synchrone des grandes tailles entrainées par des turbines à vapeur, à gaz ou hydraulique. Ils sont connectés sur le réseau de de transport via un transformateur de groupe [9].

L'ordre de grandeur de puissance active produite par ce groupe est compris entre 100MW pour les centrales thermiques de faible puissance et 1650MW pour les puissantes tranches des centrales nucléaires.

La production peut être classée suivant le type d'énergie primaire utilisé pour générer de l'électricité.

I.4.2 Transport

Il consiste à acheminer les puissances produites par les unités de production auprès des points de consommation. Donc le rôle principal des réseaux de transport est la liaison entre les grands centres de consommation (gros consommateur et distributeurs) et les moyens de production. Ce rôle est particulièrement important, car les stockages d'énergie électrique presque impossible.

Les grands centraux sont souvent près des cours d'eau et des océans, autour des fleuves. Sur le plan économique l'ordre de grandeur des distances impose entre autres le fait de véhiculer l'énergie électrique en courant alternatif sous très haute tension afin de minimiser les pertes au niveau des lignes de transmission contrairement à la production et la consommation qui réalisent à des niveaux de tension plus faibles.

Les transformateurs sont alors nécessaires pour la mise à niveau de tension [10].

Les réseaux de transport d'électricité sont composés de lignes (ou de couloirs de lignes) reliant les différents jeux de barres ou nœuds. D'une façon générale, ils ont une topologie maillée pour offrir une multiplicité de possibilité d'aller d'un nœud à un autre réseau. Les réseaux de transports doivent être exploités dans les limites de fonctionnement autorisées.

Ces limites ou autrement dit les contraintes du réseau sont exprimés par des valeurs maximales ou minimal sur certains variable de réseau (flux de puissance sur les lignes ou transformateur, niveau de tension, etc.). Dans le cas où ces limites sont dépassées à plusieurs reprises cela implique une dégradation des différents composants du système et le réseau risque de tomber dans un problème d'instabilité [11].

I.4.3 Distribution

Les réseaux de distribution acheminent l'énergie électrique du réseau de répartition (ou de transport) au client résidentiels et au petit client industriel.

Les tensions de réseaux de distribution sont comprises entre 230V à 400V pour la basse tension et 4KV à 45KV pour la moyenne tension. La structure des réseaux de distribution est exploitée en radial. Néanmoins, certains pays disposent de réseaux maillés et avec la possibilité d'une exploitation en boucle fermé [12].

Donc un réseau électrique doit satisfaire les exigences suivantes :

- Assurer au client la puissance dont il a besoin.
- Fournir une tension stable dont les variations n'excédant pas 10% de la tension nominale.
- Fournir une fréquence stable.
- Fournir l'énergie avec prix acceptable.
- Maintenir des normes de sécurité rigoureuses.
- Veiller à la protection de l'environnement.

I.4.4 Répartition

Le réseau de répartition prend sa source dans le réseau de transport à partir des postes d'interconnexion THT/HT (MT) et sert à fournir le gros consommateur industriel sous haute ou moyenne tension, et à répartir les puissances dans les différentes régions Rurales ou urbaines. Ce type de réseau utilise des typiques 60KV et 30KV [13].

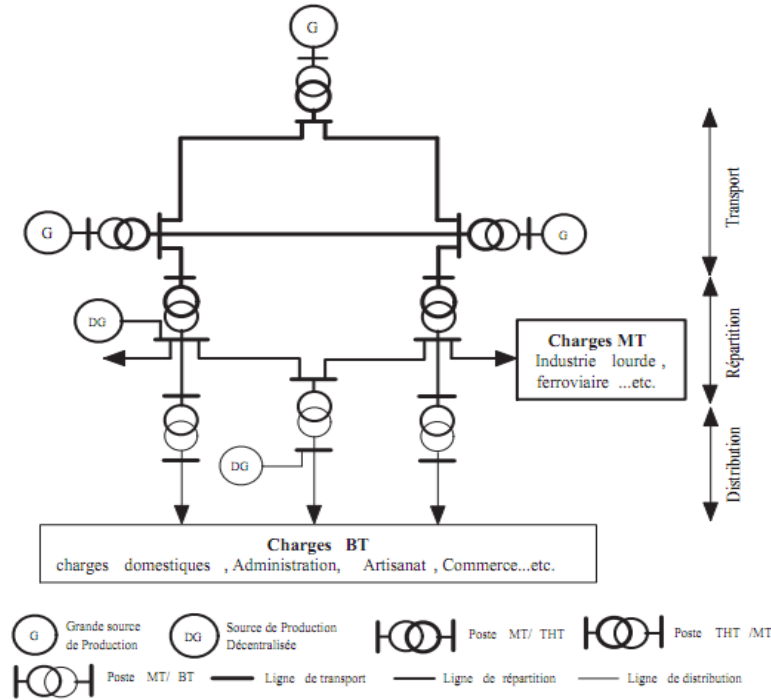


Figure I. 3 : Vue globale du réseau électrique [13].

I.5 Blackouts

Un blackout et une suspension de la distribution de courant électrique dans une région donnée, il se produit lorsqu'un déséquilibre entre la production et la consommation et engendre une perte successive des éléments du réseau électrique [14]. Voici quelque grandes pannes dans le monde :

- ✓ **Algérie 3 Février 2003** : 30 millions personnes sont privées d'électricité pendant plusieurs heures.
- ✓ **Russie 25 mai 2005** : 2 millions habitants touche pendant 5 heures.
- ✓ **Etats-Unis 26 février 2008** : trois millions de personnes sont touchées durant près de 4 heures par une énorme panne électrique en Floride.
- ✓ **Inde 31 juillet 2012** : celle-ci a touché 670 millions d'utilisateurs.

I.6 Niveaux de tension

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

- ✓ **THT** : très haute tension (very high voltage), pour des tensions composées supérieur à 220KV
- ✓ **HT** : haute tension (high voltage), des tensions composées supérieures comprises entre 33KV et 220KV
- ✓ **MT** : moyenne tension (medium voltage), des tensions composées comprises entre 1KV et 33KV
- ✓ **BT** : basse tension (low voltage) tension comprise entre 100V et 1 KV
- ✓ **TBT** : très basse tension (very low voltage), inférieure à 100V

D'autres normes existent, notamment la norme IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) [15]. Celle-ci définit la tension moyenne sur une large plage (de 1KV jusqu'à 69KV).

La norme IEEE est utilisée surtout en Amérique du nord. Il Ya aussi la norme française qui définit les niveaux comme suit :

- ✓ **HTB** : supérieure à 50KV.
- ✓ **HTA** : entre 1KV et 50KV.
- ✓ **BTB** : entre 500V et 1KV.
- ✓ **BTA** : entre 50V et 500V.
- ✓ **TBT** : inférieure à 50V.

Remarque : en pratique, il y'a des valeurs de tension standards pour chaque niveau, En Algérie ces niveaux sont 220KV en transport, 60KV et 30KV en répartition et distribution MT et 400V en distribution BT.

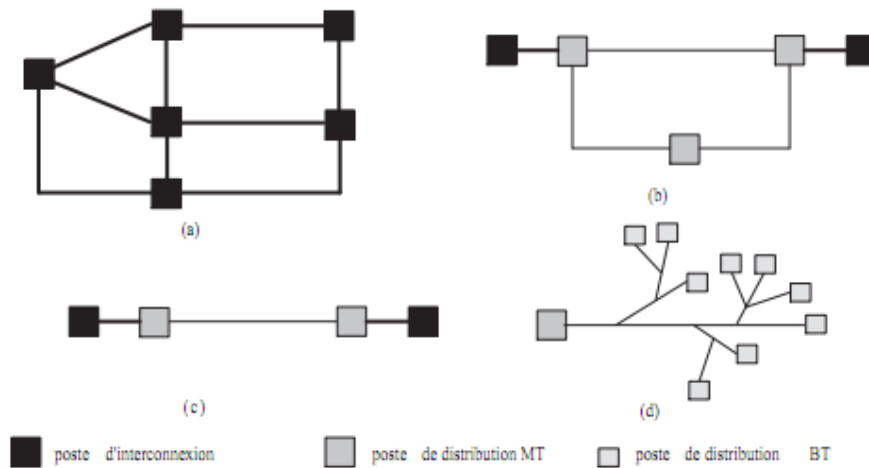


Figure I. 4 : Différent topologies des réseaux électriques (a) réseau maillé, (b) réseau bouclé, (c) réseau radial, (d) réseau arborescent [15].

I.7 Lignes électriques

Une ligne électrique est un ensemble de conducteurs, d'isolants et d'éléments accessoires destinés au transport de l'énergie électrique.

I.7.1 Types de lignes

Elles peuvent être classées selon plusieurs critères :

Suivant les fonctions qu'elles assurent dans le réseau :

- Lignes de transport.
- Lignes d'interconnexion.
- Lignes de répartition.
- Lignes de distribution.

Suivant la situation dans l'espace :

- Lignes aériennes.
- Lignes souterraines (câble).

I.7.2 Composants d'une ligne

Une ligne de transport se compose de câbles conducteurs, d'isolateur et de supports.

I.7.2.1 Supports

Le rôle des pylônes est de maintenir les câbles à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage des lignes [16].



Figure I .5: Supports des lignes aériennes HT (pylône électrique) [16].

I.7.2.2 Conducteurs

Les conducteurs nus, utilisés pour la construction des lignes aériennes, sont des câbles constitués de fils ronds, ou exceptionnellement de fils trapézoïdaux ou profilés en forme de Z.

Pour réaliser ces câbles, les métaux conducteurs de faible résistivité sont peu nombreux. Seul sont utilisé actuellement l'aluminium dans sa forme écroui dur, de grande pureté d'une part, et un alliage d'aluminium, l'almélec, d'autre part.

Depuis plusieurs années, le cuivre n'est plus utilisé en raison de sa masse et de son coût. Cependant des conducteurs en cuivre équipent encore des lignes anciennes [16].

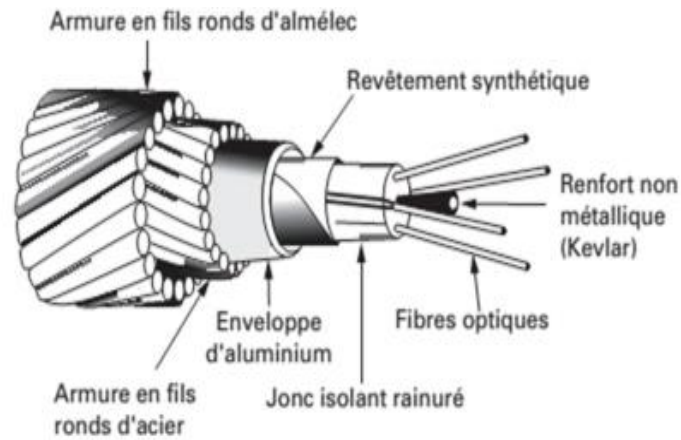


Figure I.6 : Conducteurs usuels [16].

I.7.2.3 Câble de garde

Les câbles de Gard ne transportent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs, ils sont plus tendus que ceux –ci pour assurer une bonne protection contre la foudre [16].

I.7.2.4 Isolateur

Assurent l'isolement électrique entre les câbles conducteurs et les supports, sur le réseau de transport, les isolateurs sont utilisés en chaine, dont la longueur augmente avec le niveau de tension. Les isolateurs ont deux fonctions principales :

- ✓ ils empêchent le courant électrique qui circule dans les conducteurs de phase de passer dans les pylônes
- ✓ ils accrochent les conducteurs de phase au pylône.



Figure I.7 : Câble de garde à fibres optique incorporées [5].

I.7.3 Poste de transformation (transformateur)

Par définition, un poste (une sous-station) est une installation d'organes de liaison et d'organes de manœuvre ou partaient l'énergie des centrales et d'où cette énergie est orientée vers les centrales de consommation.

Les postes électriques ont trois fonctions principales :

- Le raccordement d'un tiers au réseau d'électricité (aussi bien consommateur que producteur type centrales nucléaire).
- L'interconnexion entre les différentes lignes électriques (assurer la répartition de l'électricité entre les différentes lignes issues du poste)
- La transformation de l'énergie en différents niveaux de tension [16].



Figure I.8 : Transformateur de puissance dans un réseau électrique [16].

I.8 Topologies des réseaux électriques

Les réseaux doivent assurer le transit de l'énergie électrique avec une sécurité suffisante, cette sécurité d'alimentation est augmentée soit :

- Par les lignes avec appareillage plus solides.
- Par des circuits plus nombreux.

Alors il y'a donc un compromis à réaliser entre le coût des investissements supplémentaires et la valeur de ce qu'ils permettent de sauver ce qui conduit à des structures des réseaux différents.

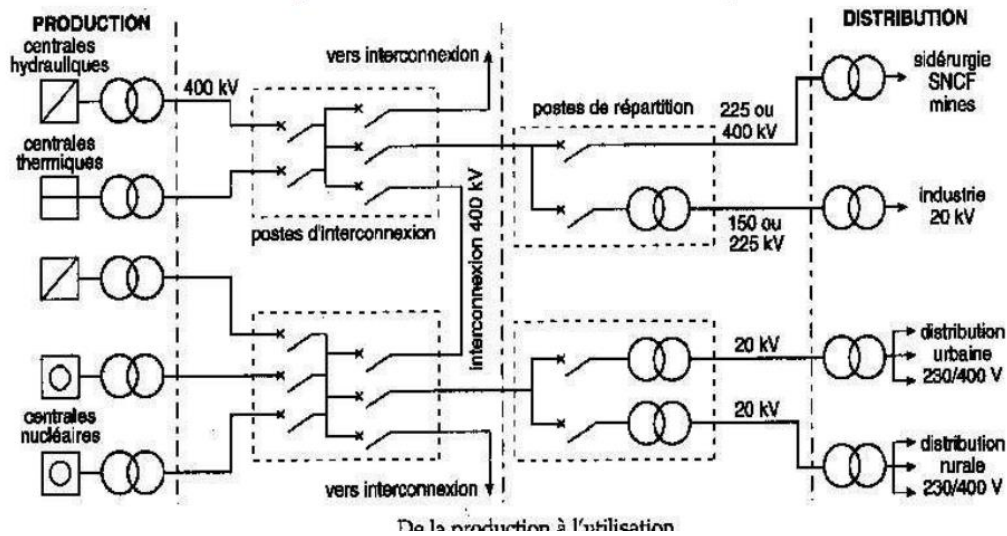


Figure I.9 : Schéma d'un réseau électrique [17].

I.8.1 Réseaux radiaux

En milieu rural, on trouve des architectures arborescentes bouclées mais exploitées en radial. Les boucles peuvent se situer entre les postes (HT/MT) ou la distance entre point de production et les points de consommation est relativement courte.

Dans un réseau radial chaque point de consommation est connecté à un seul point de distribution, ce qui simplifie la conception et la gestion du réseau.

Cependant, cela peut également rendre le réseau plus vulnérable aux pannes, car la perte d'un seul point de distribution peut affecter plusieurs points de consommation [18].

Ce système se caractérise par des points forts et des points faibles sont :

Points forts :

- Simplicité.
- Exploitation.
- Coût d'installation.

Points faibles :

- Qualité de service.

I.8.2 Réseaux bouclés

Cette structure est pratique lorsque le centre de gravité des charges est excentré par rapport au poste source. Dans ce cas, on alimente un poste nommé poste tête de pétales par un ou deux départs issus du poste source (HT/MT).

Par ailleurs, la puissance des câbles est limitée à la puissance maximale divisée par deux pour que ceux-ci puissent tenir en cas de défaut, contrairement à la maille, il n'y a plus de liaisons entre les boucles [19].

Ce système se caractérise par des points forts et des points faibles sont :

Point forts :

- Simplicité.
- Qualité de service.

Points faibles :

- exploitation avec les manœuvres plus nombreuses.
- Coûts d'installation.

I.8.3 Réseaux maillés

Cette structure est composée de boucles alimenté directement par la source (HT/MT) ou via des postes têtes débouclé reliés aux sources (HT/MT) par des conducteurs de section importante appelés câbles de structure. Les postes tête boucles ont la même structure que les postes source sauf qu'il n'y a pas de transformateur (HT/MT).

Des liaisons inter-boucles permettent le transfert des charges d'une boucle sur l'autre en cas de perte d'un câble de structure [19].

Ce système se caractérise par des points forts et des points faibles sont :

Point forts

- Qualité de service.
- Continuité de service.

Points faibles

- Exploitation avec la manœuvre plus nombreuse.
- Cout d'installation.
- Complexe.

I.9 Actualité de réseau électrique

Début de l'année 2025, l'infrastructure électrique est confrontée à divers défis. Qu'il s'agisse de systèmes obsolètes ou d'une demande énergétique croissante, le besoin de progrès technologiques n'a jamais été aussi important.

Malgré les avantages, il existe également des obstacles à la mise en œuvre, notamment les coûts, les lacunes de l'infrastructure et les questions de politique et de réglementation [20].

I.9.1 État actuel de l'infrastructure électrique

L'état actuel de l'architecture électrique envisage un environnement à multiples facettes caractérisé par des systèmes électriques existants, une demande croissante d'approvisionnement en énergie fiable et la nécessité de vastes initiatives structurelles pour moderniser et améliorer la fiabilité du réseau [20].

I.9.2 Défis pour l'infrastructure électrique

L'infrastructure électrique est confrontée à de nombreux défis, notamment la maintenance du réseau, les problèmes de fiabilité du réseau et la dynamique de la transition du marché de l'énergie.

I.9.3 Maintenance des réseaux

La maintenance est devenue un enjeu critique dans le secteur. Le maintien d'une maintenance efficace du réseau est essentiel pour soutenir le bon fonctionnement de l'infrastructure électrique, réduire les temps d'arrêt et éviter les pannes du système.

Divers facteurs influencent la nécessité d'un entretien continu, notamment le vieillissement des infrastructures, les conditions environnementales et la demande croissante d'électricité.

Par exemple, un réseau électrique plus ancien peut sembler vulnérable à d'autres défaillances, ce qui entraîne des interruptions de service pour les consommateurs.

Les catastrophes naturelles telles que les tempêtes peuvent endommager les lignes électriques, nécessitant un entretien immédiat pour rétablir les services.

La volatilité du marché de l'énergie affecte également de manière significative la priorité accordée à la maintenance des réseaux électriques.

En cas d'augmentation volatile des prix de l'énergie, les fournisseurs de services peuvent être amenés à adapter leurs calendriers de maintenance pour atteindre des coûts optimaux tout en maintenant la fiabilité [21].

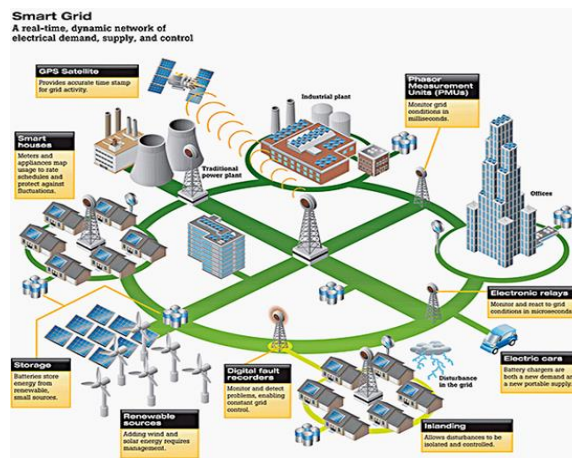


Figure I.10 : Les Smart Grids [22].

I.10 Technologies à venir dans le développement des réseaux électriques

En 2025, plusieurs technologies émergentes devraient révolutionner le développement des infrastructures électriques, avec un accent particulier sur l'automatisation des réseaux électriques, la gestion avancée de l'énergie et l'optimisation des performances des réseaux.

I.10.1 Réseaux intelligents

Les réseaux intelligents représentent une nouvelle ère dans l'évolution des réseaux électriques, où les objets connectés (IOT) et les outils d'analyse avancée sont

utilisés pour optimiser la distribution de l'énergie et améliorer les performances du réseau.

Ces systèmes complexes facilitent la surveillance en temps réel et la régulation instantanée des flux d'électricité, permettant ainsi des réponses plus efficaces aux fluctuations de l'offre et de la demande.

En exploitant les données issues des dispositifs IOT (Internet of Things) et en appliquant des analyses prédictives, les réseaux intelligents peuvent identifier rapidement les anomalies, anticiper les pannes et réorienter l'alimentation pour atténuer les perturbations.

Ces approches préventives permettent non seulement d'améliorer la fiabilité et la robustesse du réseau, mais aussi d'optimiser l'efficacité énergétique et de réduire les coûts d'exploitation, tant pour les fournisseurs d'électricité que pour les consommateurs [20].



Figure I.11 : réseau intelligent [20].

I.10.2 Petits réseaux électriques

Les petits réseaux sont des réseaux locaux capables de fonctionner indépendamment ou en collaboration avec le réseau électrique principal, améliorant ainsi la résilience et la flexibilité énergétique du réseau en améliorant la connectivité du réseau.

Il offre une gamme d'avantages en fournissant une alimentation électrique plus fiable et plus sûre, en particulier dans les situations d'instabilité du réseau ou de pannes de courant. Les petits réseaux ont la capacité de se déconnecter de manière transparente du réseau principal en cas d'urgence, assurant ainsi l'approvisionnement continu en énergie des organisations critiques telles que les hôpitaux, les installations militaires et les centres de données.

Cette fonction améliore non seulement la résilience globale du réseau, mais aussi la flexibilité énergétique locale. De plus, les micro-réseaux facilitent l'introduction de sources d'énergie renouvelable telles que les panneaux solaires et les dispositifs de production d'énergie éolienne dans le réseau, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles et les émissions de carbone [20].



Figure I.12 : Petits réseaux électriques [20].

I.10.3 Energie renouvelable

Les énergies renouvelables désignent des sources d'énergie inépuisable et disponibles en quantité illimitée. Elles proviennent principalement de cinq sources : l'eau, le vent, le soleil, la biomasse et la géothermie. Ces énergies permettent de produire de l'électricité.

L'énergie renouvelable pouvant être utilisée pour le chauffage, l'éclairage la production ou encore pour les transports.

Elles sont donc inépuisables et ne produisent pas de gaz à effet de serre.



Figure I.13 : Energie renouvelable [5].

I.10.4 Systèmes de stockage d'énergie

Les systèmes de stockage d'énergie sont essentiels au maintien de la stabilité du réseau et à l'amélioration de l'efficacité énergétique en stockant et en distribuant l'énergie excédentaire pendant les périodes de pointe de la demande.

En régulant efficacement le flux d'électricité, ces systèmes contribuent à l'équilibre de la dynamique de l'offre et de la demande, réduisant ainsi la possibilité de pannes de courant ou de pannes de réseau.

Ils facilitent l'intégration des énergies renouvelables, qui peuvent apparaître par intermittence, en fournissant un réservoir de stockage de l'énergie générée pour une utilisation future.

Ainsi, un réseau électrique plus durable et plus fiable est favorisé, facilitant les transitions en douceur entre les périodes de demande de pointe et les périodes de demande hors pointe, tout en maintenant la fiabilité et la qualité de l'énergie [25].

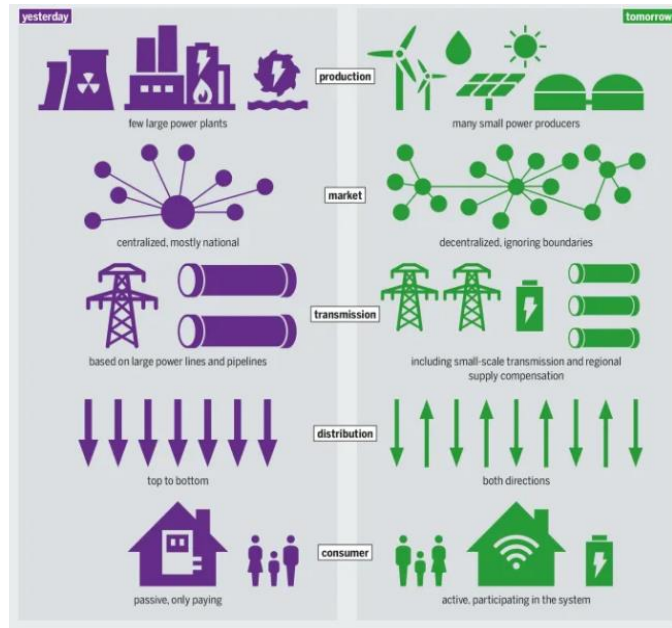


Figure I.14 : Changement structural attendu dans le système énergétique apporté par l'utilisation accrue d'outil numérique [26].

I.10.5 Avantages de la mise en œuvre de ces techniques

L'intégration de technologies modernes dans l'infrastructure électrique offre de nombreux avantages, tels que l'augmentation de l'efficacité énergétique, l'amélioration des fonctions du réseau, la fourniture de services publics innovants et l'adoption de pratiques électriques durables [27].

I.11 Fondements et facteurs physiques qui distinguent les réseaux électriques

I.11.1 Équilibre parfait entre l'offre et la demande (production et consommation)

Le réseau électrique est régi par plusieurs lois physiques qui nécessitent un équilibre instantané de la production et de la consommation, et tout déséquilibre dans cet équilibre peut signifier la perte d'une grande partie du réseau, et donc la perte d'énergie au profit de groupes de consommateurs.

Le pire peut arriver, c'est-à-dire l'endommagement de certains appareils coûteux du réseau tels que les générateurs, les transformateurs et les lignes [28].

I.11.2 La difficulté et le coût élevé du stockage de l'électricité

Le stockage de l'électricité est très difficile, pour des raisons économiques et des raisons liées à la disponibilité des matériaux utilisés pour le stockage, tels que le lithium et le cobalt. Par conséquent, la quantité d'électricité produite doit être consommée ailleurs au même moment.

Le thème du stockage d'énormes quantités d'énergie à haut rendement et à un prix abordable est un sujet très actif dans le domaine de la recherche [29].

I.11.3 Direction du déplacement et transport de l'électricité

Le transport de l'électricité est un processus complexe qui dépend des facteurs physiques du réseau, et les prix de l'électricité peuvent varier d'un endroit à un autre dans le même réseau en raison de ces facteurs.

En raison de ces facteurs physiques, l'électricité peut se déplacer d'endroits où le prix unitaire est élevé vers des endroits où les prix sont plus bas, ce qui est contraire à la nature de tous les autres marchés [30].

I.12 Problème de l'écoulement de puissance

Le problème de l'écoulement de puissance consiste à calculer les tensions du réseau électrique pour des extrémités spécifiées et des conditions données aux jeux de barres.

Il est énoncé par la spécification des charges en mégawatts et en méga vars qui doivent être alimentées à certains jeux de barres et par la puissance générée et les modules de tension aux restes des jeux de barres.

Une description totale de la topologie du système en utilisant leurs impédances (admittances) est nécessaires les tensions calculées sont utilisées pour déterminer toute l'autre grandeur tels que les courant dans les lignes de transport, la puissance et les pertes de puissance [8].

I.12.1 Formulation des équations d'écoulement de puissance

Dans cette partie, toute les grandeurs sont exprimées en valeurs relatives (système per unit ou pu) à partir d'une puissance apparente triphasé se base et de la tension nominale composée de chaque jeu de barres, avec une tension de base par niveau de tension.

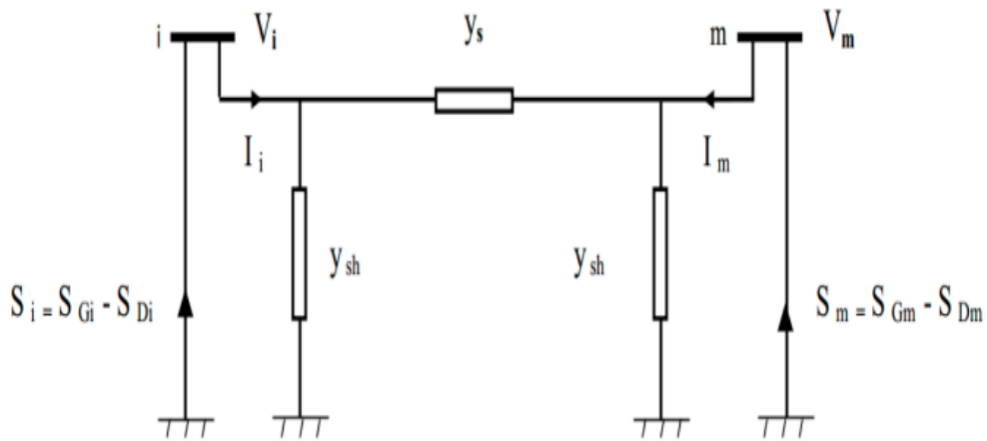


Figure I.15 : Réseau à nœuds [31].

L'étude de l'écoulement de puissance permet d'avoir la solution de la grandeur d'un réseau électrique en fonction normal équilibré en régime permanent.

Un modèle mathématique de ce système doit être déterminé pour pouvoir résoudre le problème de l'écoulement de la puissance.

Considérons le schéma représentatif du réseau de la figure (I.15), la puissance apparente au nœud (i) est donnée par la relation suivante :

$$S_i = V_i I_i^* \tag{I. 1}$$

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} = P_{Gi} - P_{Di} - j Q_{Gi} - j Q_{Di} \tag{I. 2}$$

I.12.2 Types de nœuds des réseaux électriques

Le tableau représente les différents types de nœuds des réseaux électriques

Tableau I. 1 : types des nœuds de réseau électrique [32].

Type de nœuds	Variables connues	Variables inconnues
PQ	La puissance active et réactive (P, Q)	Tension amplitude et angle de (V, δ)
PV	Puissance active et la tension (P, V)	Angle de phase de tension et puissance réactive (δ, Q)
Référence	Tension amplitude et angle de phase (V, δ)	la puissance active et réactive (P, Q)

I.12.3 Objectifs de l'écoulement de puissance

L'analyse de l'écoulement de puissance dans les réseaux électrique a plusieurs vues dont les plus important sont :

- ✓ La continuité de service : assurer l'alimentation en électricité pour tous les abonnés d'une façon continue (sans rupture).

- ✓ Le bon fonctionnement du réseau : de telle manière que tous l'élément du réseau fonctionnent dans leurs valeurs nominal (assurer leur duré de vie optimal).
- ✓ La bonne qualité d'énergie : en assurant une fréquence stable et des tensions admissibles pour de tout le jeu de barres ainsi qu'une forme sinusoïdale de l'onde.
- ✓ Une excellente réputation du fournisseur : afin de parvenir à la satisfaction de l'abonné [33] [34] [35].

I.12.4 Méthodes de résolution de l'écoulement de puissance

La solution de l'écoulement de puissance en fonction de la matrice d'impédance nodale a été brièvement expérimentée, mais les problèmes de stockage informatique et la vitesse sont devenus des problèmes insurmontables à l'époque.

Pour surmonter ces limitations, il existe un grand nombre de méthodes [36].

L'écoulement de puissance repose sur les équations suivantes :

1. Équations des mises à jour des tensions pour la méthode de Gauss-Seidel :

$$V_i^{k+1} = \frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i^k}{(V_i^k)^*} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^{k+1} - \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} V_j^k \right) \quad (\text{I.3})$$

2. Équations simplifiées pour la méthode du Fast Decoupled Load Flow (découplée rapide) :

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P}{|V|} \\ \frac{\Delta Q}{|V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (\text{I.4})$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P}{|V|} \\ \frac{\Delta Q}{|V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B' & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -B'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (\text{I.5})$$

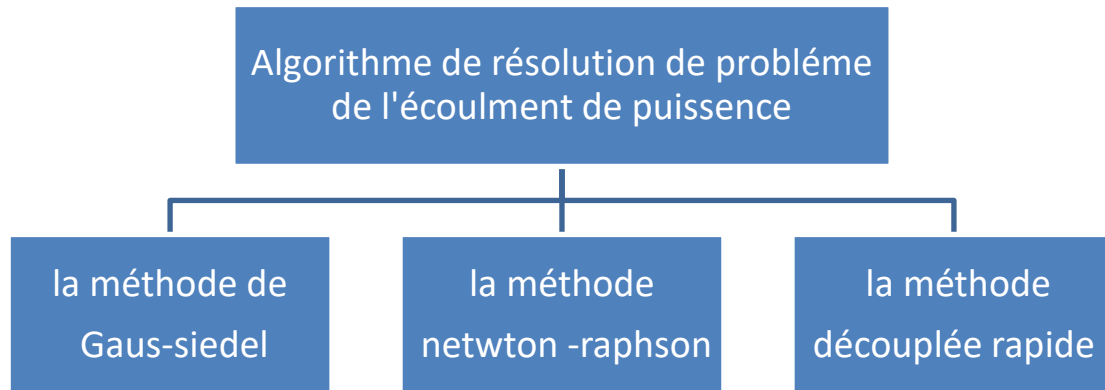


Figure I.16 : Algorithme de résolution du problème de la répartition de charges

Méthode de Gauss-Seidel : la formule de la tension dans les nœuds PQ est donnée par :

$$V_i^{k+1} = \frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i^k}{(V_i^k)^*} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^{k+1} - \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} V_j^k \right) \quad (\text{I.6})$$

Les angles et la puissance seront déduits par le biais de la formule :

Dans chaque itération, le vecteur de tension obtenu qui remplacera l'ancienne valeur, c'est-à-dire :

V_i^{k+1} Remplace V_i^k le processus se termine une fois que :

$$\Delta V_i^{k+1} = V_i^{k+1} - V_i^k < \epsilon \quad (\text{I.7})$$

Ou ϵ représente la tolérance.

La méthode de Gauss –Seidel accélérée (par relaxation) est apparue, pour un gain de temps de calcul et un nombre d'intégrations minimal, en introduisant un coefficient d'accélération α tel que :

$$\Delta V_i^{k+1} = V_i^{k+1} - V_i^k < \epsilon \quad (\text{I.8})$$

$$V_{iacc}^{k+1} = V_i^k + \alpha \Delta V_i^k \quad (\text{I.9})$$

La méthode de Newton –Raphson et ces formulations dérivées ont été développés au début des années 1970 et sont devenues fermement établies dans l'industrie des réseaux électriques [37] [38].

De point de vue mathématique, la solution de l'écoulement de puissance consiste à résoudre l'ensemble des équations algébriques non linéaires, qui dérivent le réseau électrique sous régime permanent stable.

Au fil des ans, plusieurs approches ont été proposées pour la solution des équations l'écoulement de puissance. Les premières approches ont été basées sur les équations bouclées et les méthodes numériques de type Gauss.

La méthode était laborieuse parce que les boucles de réseau devaient être précisées au préalable. L'amélioration de ces techniques ont vu l'introduction de l'analyse nodale en faveur de l'analyse de la boucle, ce qui conduit à une réduction considérable de la préparation des données.

Néanmoins, la fiabilité de la convergence était encore la principale préoccupation. D'autres développements ont abouti à la mise en place de la méthode de Gauss-Seidel avec des facteurs d'accélération. L'appel de cette génération de méthode de l'écoulement de puissance est leur exigence minimale de stockage et le fait qu'ils sont faciles à comprendre et à coder sous forme de programmes informatiques.

L'inconvénient est que ces algorithmes présentent une mauvaise caractéristique de convergence lorsqu'elles sont appliquées à la solution des réseaux de taille réaliste [23] [24]. La méthode de Newton-Raphson en raison de la convergence quadratique, cette méthode est mathématiquement supérieure à la méthode de Gauss-Seidel et plus efficace pour les grands systèmes d'alimentation avec une convergence robuste et un nombre réduit d'itérations. La méthode découplée rapide s'agit d'une variante de l'algorithme de Newton-Raphson.

I.13 Ecoulement de puissance optimale

Le flux de puissance optimal aussi dénommé en anglais « Optimal Power Flow (OPF) » est un problème qui suscite un grand intérêt chez les chercheurs et les praticiens de l'industrie depuis son introduction par Dommel et Tinney en 1968.

L'OPF est défini comme un outil mathématique utilisé pour trouver les paramètres optimaux du réseau électrique. L'objectif principal du problème d'OPF est d'optimiser une fonction objective spécifique tout en satisfaisant les contraintes de faisabilité et de sécurité.

L'OPF a été largement utilisé dans des études précédentes, et a servi de problème test d'optimisation substantiel parce qu'il est caractérisé comme multidimensionnel, non linéaire non convexe à grande échelle, et fortement contraint.

Plusieurs formulations d'OPF ont été développées au cours des dernières décennies afin d'optimiser le fonctionnement d'un système d'énergie électrique soumis à des contraintes physiques. Le problème d'optimisation émergeant utilise différents noms et différentes fonctions objectives. De nombreuses approches de solution d'OPF ont été développées chacune avec des caractéristiques mathématiques et des exigences de calcul distinctes.

Ces dernières années, les problèmes d'optimisation de l'OPF ont repris de l'importance en raison de l'adoption rapide de ressources énergétiques distribuées dans le réseau [8].

I.13.1 Objectives d'écoulement de puissance optimale

- ✓ Réduire les couts pour répondre à la demande de charge d'un système d'alimentation tout en présent la sécurité de système.
- ✓ Le maintien de la sécurité du système.
- ✓ Déterminer des données de cout marginal du système.
- ✓ La qualité de solution [41].

I.13.2 Défis d'écoulement de puissance optimal

- ✓ En raison de la prise en compte d'un grand nombre de contraintes et du non linéarité du modèle mathématique, OPF représente un défi de taille pour les mathématiciens ainsi que pour l'ingénieur dans l'obtention de solution optimale.
- ✓ Le marché de l'électricité dérèglement demande à OPF de répondre à différents types de participant au marché, aux exigences du modèle de donnes, au traitement en temps réel et à la sélection de cout de revient approprié pour chaque évaluations de service dégroupé.
- ✓ Répondre aux exigences en matière de temps de réponse, de modélisation des externalités (flux en boucle, transferts environnementaux et simultanés), ainsi que de fonctionnalité et de sensibilité, pour une utilisation en ligne.
- ✓ Dans quelle mesure l'avenir de l'OPF fournira –t-il des mesures de contrôle locales ou globales pour supporter l'impact d'éventualités critique menaçant la stabilité du système et la stabilité de l'angle, simulées.
- ✓ Future doit prendre en compte toute la gamme d'options et d'environnement de transmission non groupé et d'autres allocations de ressourcées.
- ✓ En fin, il doit être simple à utiliser, portable et suffisamment rapide [42].

I.13.3 Domaines d'application de l'écoulement de puissance optimal

Les applications de la fonction émolument de puissance optimal peuvent être classées en application d'exploitation et celles de planification dans le domaine d'exploitation, on distingue l'application d'ordre économique et celles d'ordre technique dans chaque catégorie on trouve plusieurs applications dont les plus courants sont :

1. Minimisation du cout de combustible.
2. Minimisation des pertes.
3. Amélioration du profil de tension.
4. Amélioration de la stabilité de la tension.
5. Maximisation de la puissance transmissible [42].

I.14 Conclusion

Dans la première partie, nous avons présenté d'une manière générale le principe de fonctionnement d'un réseau électrique, ainsi que la structure des différents sous-systèmes, de la production jusqu'à la consommation finale. Une deuxième partie a été consacrée à l'écoulement de puissance et son rôle.

Le but de la dernière partie est l'étude de l'écoulement de puissance par la méthode de Newton –Raphson, qui permettra par son application, d'avoir des informations sur l'état du réseau à étudier pour des paramètres précis.

L'optimisation des flux d'énergie implique de minimiser les coûts de production tout en répondant à différentes contraintes.

Chapitre II

Energies Renouvelables

II .1 Introduction

Les énergie renouvelables sont des énergies primaires inépuisables à très long terme ,car issue directement de phénomènes naturel, réguliers ou constants, liés à l'énergie du soleil, de la terre ou de la gravitation. L'énergie renouvelables sont également plus « propres » (moins d'émission de CO₂, moins de pollution) que les énergies issues de source fossiles.

L'augmentation du coût des énergie classique d'une part et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie renouvelable devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre.

Ce chapitre consacré à l'étude des énergies renouvelables, la première partie de ce chapitre commence par donner une vision générale sur les types des énergies renouvelables. Ce chapitre présent aussi les avantages des énergies renouvelables dans les réseaux électriques.

Nous citons aussi la production ou niveau mondiale est en Algérie. Finalement en présente les énergies photovoltaïques.

II.2 Différents sources d'énergie renouvelable

L'énergie renouvelable est utilisée pour désigner l'énergie inépuisable et disponible en quantité limitée. Celles-ci proviennent principalement de la source d'énergie avec les différentes sortes d'exploitation suivant :

Les principales énergies renouvelables sont :

- La puissance hydraulique.
- L'énergie biomasse.
- L'énergie solaire.
- L'énergie éolienne.
- L'énergie géothermique.
- L'énergie de la mer.

Les différentes sortes d'exploitation :

- Le vent (les éoliennes).
- Le soleil (les panneaux photovoltaïques et les panneaux solaire).
- L'eau (l'hydraulique).
- La végétation (la biomasse).

Tableau II-1 : Les différentes sources renouvelables employées à des fins énergétique [44].

Quelle source	Comment la capter et la transformer	Sous quelle forme l'utiliser
Photovoltaïque	Cellules photovoltaïque	-Electricité ou stocké en batteries -Electricité injectée dans le réseau
Thermique	-Serres, murs capteurs -Capteurs solaires basse température -Capteur solaire haute température	-Chauffage -Eau chaude sanitaire -Chauffage par le plancher -Electricité injectée dans me réseau -Chaleur à très haute température dans un four
Eolien	-Moulin à vent -Eolienne mécanique -Aérogénérateur	-Force mécanique (mouture de céréales ...) -Force mécanique (pompe de l'eau -Electricité directe ou stockée en batteries -Electricité injectée dans le réseau
Hydraulique	-Moulin à eau -Petite centrale hydroélectrique -Grande centrale hydroélectrique -Marémotrice (courant marins et vagues	-Force mécanique (mouture de céréales.) -Electricité directe ou stockée en batteries -Electricité injectée dans le réseau
Biomasse	-Distillerie, unité d'estérification (blé, betterave, colza, tournesol) -Chaudière biocombustibles (bois, sciure, paille, rafles de mais.....) -Bio digesteur, méthaniser (déchets organiques, poubelles	-Biocarburants pour les transports -Chauffage -Electricité (cogénération) injectée dans le réseau -Biogaz pour les transports, pour le chauffage ou l'électricité
Géothermie	-Pompes à chaleur (source à moins de 30°C -Centrales basse et moyenne énergie (130°C à 150° C) -Centrales haute énergie (plus de 150° C)	-Chauffage -Climatisation -Chauffage -Electricité injectée dans le réseau

II .3 Production d'énergie électrique

Une centrale de production d'énergie électrique est un site industriel destiné à la production d'électricité. Les centrales électrique transforment différents sources d'énergie naturelles en énergie électrique afin d'alimenter en électricité les consommateurs, particuliers ou industriels relativement lointains. Le réseau électrique permet de transporter puis de distribuer l'électricité jusqu'aux consommateurs [45].

Il existe cinq principaux types de centrales électriques :

- Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dites centrales thermique classique.
- Les centrales nucléaires qui sont également des centrales que l'on peut quantifier de thermique.
- Les centrales hydroélectriques.
- Les centrales solaires ou photovoltaïques.
- Les centrales éoliennes.

II .4 Différent types d'énergie renouvelable

II .4.1 Energie éolienne

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire.

Air chaud + air froid → Dépression atmosphérique → Entraînement des pales → Entraînement du générateur électrique [46].

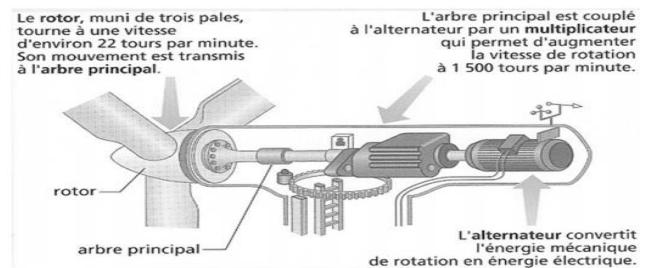
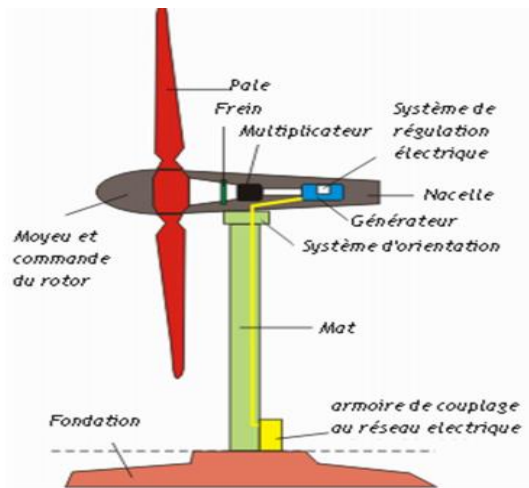


Figure II.1 : Elements d'une éolienne [46].

La puissance fournie par l'éolienne est :

$$p = 0.6 * v^3 \tag{II. 10}$$

Avec v la vitesse de vent en [m/s].

II .4.2 Géothermie

La géothermie désigne aussi l'énergie géothermique issue de l'énergie de la terre qui est convertie en chaleur.

On distingue trois types de géothermie :

- La géothermie peu profonde à basse température.
- La géothermie profonde à haute température.
- La géothermie très profonde à très haute température.

L'énergie géothermique est exploitée dans des réseaux de chauffage et l'eau chaude, ou pour produire de l'électricité [46].

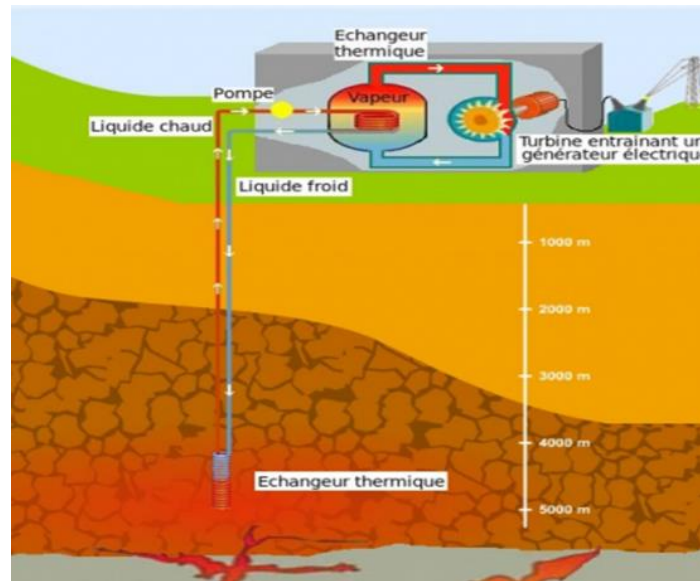


Figure II.2 : La géothermie [46].

II .4.3 Biomasse

La biomasse est une source d'énergie dérivée de matières organique comme les résidus agricoles, le bois, les déchets alimentaires et les cultures énergétiques. Elle peut être utilisée pour produire de la chaleur, de l'électricité ou des biocarburants.

Elle peut être utilisée pour produire de la chaleur, de l'électricité ou des biocarburants.

La combustion, la gazéification et la fermentation sont les principales méthodes de conversion de la biomasse en énergie, offrant une alternative durable et souvent locale aux combustibles fossiles, tout en contribuant à la gestion des déchets [47].

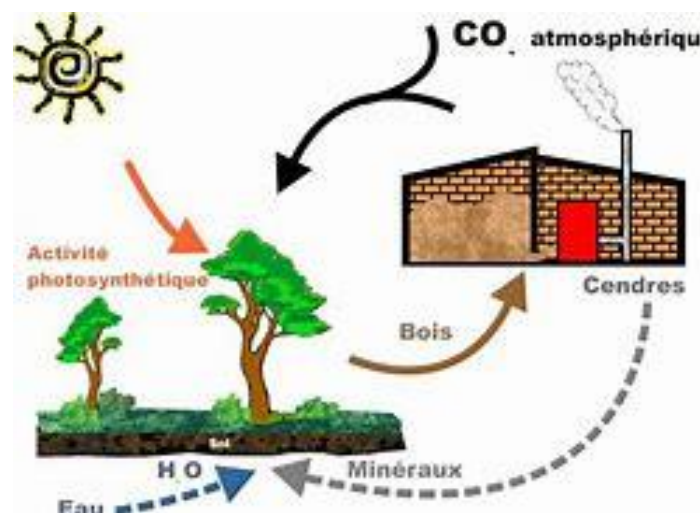


Figure II.3 : Bilan de cycle biomasse [48].

II .4.4 Energie Marine

L'énergie marine est issue de technologie qui utilise l'énergie cinétique et thermique de l'eau de mer (les vagues ou les courants, par exemple) pour produire de l'électricité ou de la chaleur.

Le développement des systèmes d'énergie marine en est encore à ses débuts, avec plusieurs prototypes de dispositifs exploitant l'énergie des vagues et des courants de marée actuellement à l'étude. Le potentiel théorique de l'énergie marine dépasse largement les besoins énergétiques actuels de l'humanité [48].

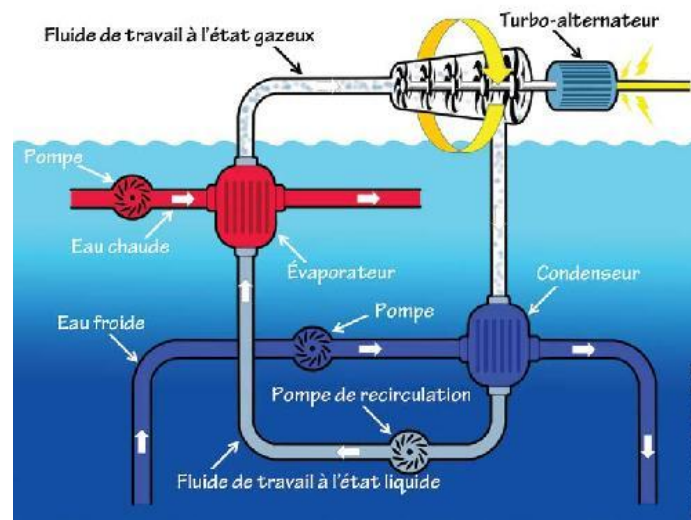


Figure II.4 : énergie Marine [49].

II .4.5 Energie solaire

II .4.5.1 Définition

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le soleil sous la forme de lumière et de chaleur, cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classé parmi l'énergie renouvelables.



Figure II.5 : énergie solaire [5].

La puissance maximale fournie par un panneau solaire est donnée par la caractéristique suivante :

$$P_s = P_1 \times E_c \times (1 + P_2 \times (T_j - T_{jref})) \tag{II. 11}$$

E_c : Le rayonnement solaire

T_{ref} : La température de référence de panneaux de 25C°

T_j : la température de jonction des cellules

P_1 représente de dispersion caractéristique des panneaux et la valeur pour un panneau est incluse entre 0.095 et 0.105 et le paramétré $P_2 = \frac{-0.47\%}{C^\circ}$ est la dérive en température des panneaux.

Le paramètre P_3 est un paramètre empirique ajouté pour améliorer la précision du modèle. Il permet de mieux représenter le comportement réel des panneaux solaires dans certaines conditions.

L'ajout d'un paramétré P_3 à la caractéristique, donne des résultats plus satisfaites :

$$P_s = P_1 \times (1 + P_2 \times (T_j - T_{jref})) \times (P_3 - E_c) \tag{II. 12}$$

Ce modèle simplifié permet de déterminer la puissance maximale fournie par un groupe de panneaux pour le rayonnement solaire et la température de panneau donnée, avec seulement trois paramètres constants P_1 , P_2 et P_3 et une équation simple à appliquer.

Une centrale solaire thermique consiste en une production de chaleur du système solaire qui s'alimente à partir des turbines dans un cycle thermique de production d'électricité.

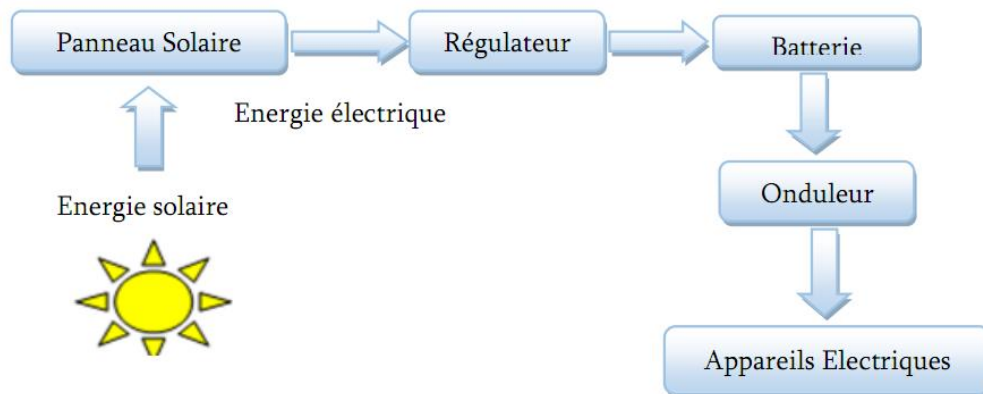


Figure II.6 : chaîne de conversion de photovoltaïque [50].

II .4.5.2 Avantages

- Acceptation du public.
- L'énergie solaire ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants.
- L'énergie solaire captée par la terre pendant une heure pourrait suffire à la consommation mondiale pendant une année.

- Les systèmes photovoltaïque sont très sûrs et d'une grande fiabilité.
- adapté aux pays chauds et aux sites isolés.
- L'énergie solaire exige peu de maintenance.
- peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments.
- L'énergie solaire présente, outre tout l'avantage de l'énergie renouvelable, ses propres avantages, à savoir : énergie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions.
- Frais de maintenance relativement faibles [51].

II 4.5.3 Inconvénients

- Coût encore élevé.
- Puissance assez faible.
- Disponibilité.

II .4.5.4 Principe physique de l'énergie solaire

Le soleil émet des rayonnements principalement dans la partie « visible » du spectre (lumière, entre 400 et 700 nm.), plus la longueur d'onde du rayonnement est courte, plus la qualité d'énergie portée par les photons est grande. Cette énergie peut se transmettre sous forme de chaleur, l'énergie va exciter les atomes composant la matière, qui vont s'agiter et s'échauffer.

Exposées aux rayons du soleil, les capteurs vont convertir l'énergie des photons, soit en énergie thermique, soit en énergie électrique [52].

II .4.5.5 Types de l'énergie solaire

On utilise l'énergie solaire en captant en captant les rayons du soleil et en transformant en électricité ou en utilise leur chaleur, il existe trois types d'énergie solaire sont :

1- Energie solaire photovoltaïque

Dans ce type l'exploitation photovoltaïque de l'énergie solaire, à partir de l'utilisation des modules ou panneaux photovoltaïque, composée de cellule solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation [55].

2- Energie solaire thermique

Elle produisant de la chaleur à partir du rayonnement solaire infrarouge, afin de chauffer de l'eau, de l'air ou un autre fluide (la technologie est assez simple, comparée au photovoltaïque) donc moins onéreuse.

Il s'agit de capter les calories grâce à des surfaces absorbant de la chaleur, des plaques métalliques peintes en noir par exemple, ils sont très répandus dans le pays à fort ensoleillement pour produire de l'eau sanitaire destinée aux habitations n'ayant pas besoin de chauffage central (pays d'Afrique, Grèce ...) [53].

3- Energie solaire thermodynamique

Concerne de grandes centrales équipées de concentrateur du rayon solaire, sous forme de miroirs galbés dont la fonction est de chauffer un fluide à haute température afin de générer de la vapeur par échange thermique pour ensuite produire de l'électricité à la

moyenne de turbine à vapeur, c'est sur ce principe que fonctionnent le four solaire de « FONT-ROMEU » en France [54].

II.4.5.6 Générateur photovoltaïque GPV

Un générateur PV est un système complet permet d'assurer la production de l'énergie électrique afin de satisfaire le besoin énergétique pour un certain nombre d'applications domestiques ou industrielles. La cellule photovoltaïque produit une puissance de quelques watts avec une tension faible, le regroupement de plusieurs cellules en série et / ou en parallèle donne un panneau solaire photovoltaïque.

Un générateur photovoltaïque (GPV) est une combinaison d'un ou de plusieurs modules PV ou panneaux en série et / ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées par exemple la puissance, le courant et la tension [55].

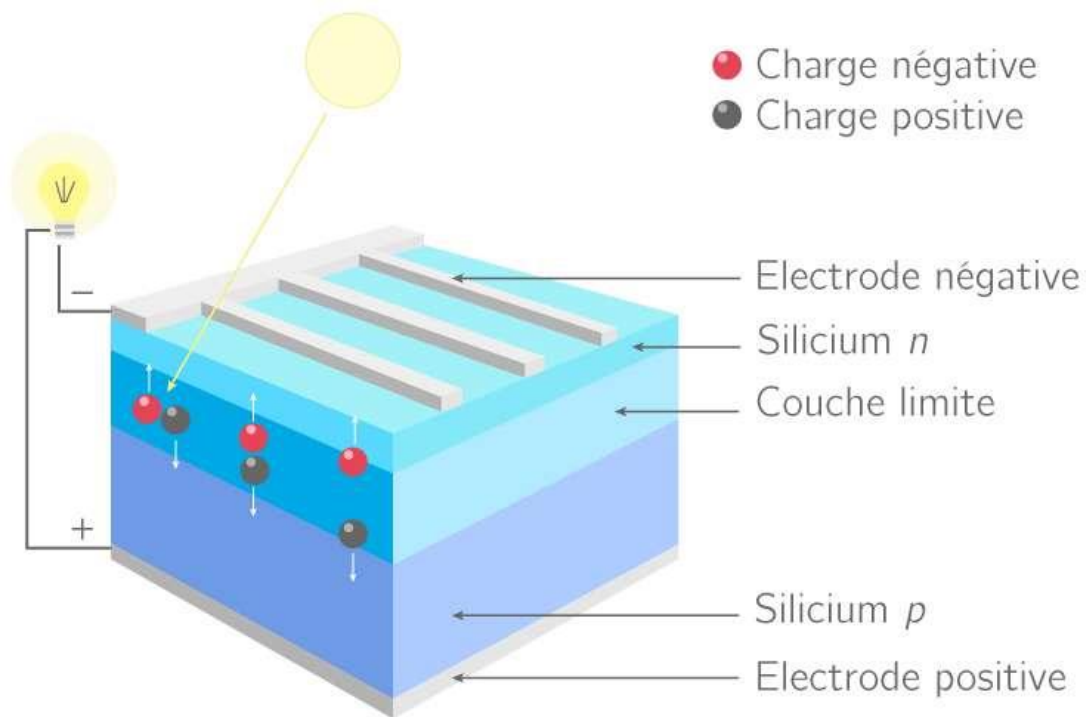


Figure II.7 : la cellule au champ photovoltaïque [55].

II.4.5.7 Cellule photovoltaïque

C'est un composant électronique qui permet de produire l'électricité à partir du rayonnement lumineux du soleil, la cellule PV est constituée de semi-conductrices (matériaux isolants + matériaux conducteurs) [56].

a) Composante de cellule PV

- ✓ la première couche (négative) est fabriquée en silicium ajouté une petite quantité de phosphore (type N)
- ✓ la deuxième couche (positive) est fabriquée en silicium ajouté une quantité de bore (type P)

- ✓ la couche supérieure est une substance transparente (matériau anti-réflexion pour absorption de la plus grande quantité de rayonnement solaire pour générer efficacement l'énergie électrique de manière efficace).

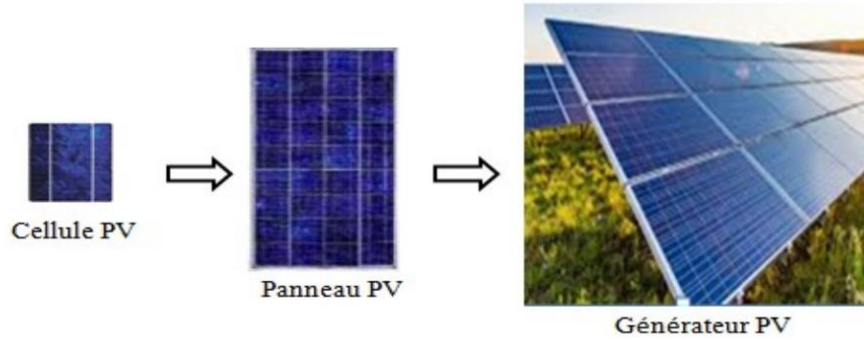


Figure II.8 : Composantes de cellule photovoltaïque [52].

b) Fonctionnement de cellule PV :

La transformation de la cellule photovoltaïque pour produire de l'électricité repose sur l'absorption des photons par le matériau constituant le dispositif, suivie de la conversion de l'énergie des photons en énergie électrique. Cela conduit à la création de paires électron-trou dans le matériau semi-conducteur et à la collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant.

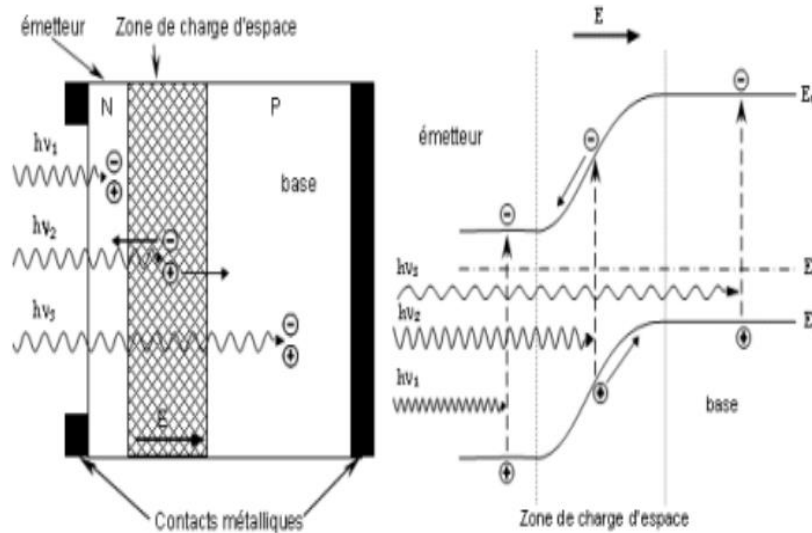


Figure II.9 : modélisation d'une cellule PV [45].

- ✓ Dans la zone (n) ou (p), les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont «envoyés » par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou

dans la zone n (pour les électrons) ou ils seront majoritaires. On aura un courant de diffusion.

- ✓ Dans la zone de charge d'espace, le pair électron /trou créés par les photons incidents sont dissociés par les champs électriques ; l'électron vont aller vers la région (n), les trous vers la région (p). Ces deux contributions s'ajoutent pour donner le courant photoélectrique résultant, qui est proportionnel à l'intensité lumineuse [57].

II .5 Application des systèmes photovoltaïques

II .5.1 Systèmes raccordés au réseau (connecté au réseau)

La figure (II .10) représente un système PV connecté au réseau électrique dont le rôle principal est de contribuer à la production d'électricité d'origine renouvelable sur le réseau, d'un point de vue de la physique l'énergie produite par les générateurs PV est directement réinjecté sur le réseau électrique.

La consommation des charges locales de l'habitat est assurée par le réseau électrique lui-même le réseau est utilisé en appoint de la production PV [58].

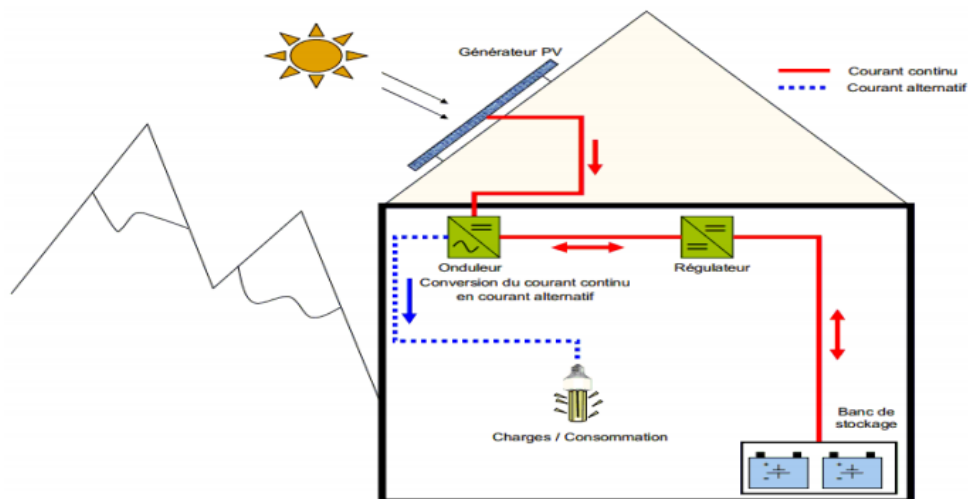


Figure II.10 : Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau électrique [58].

II .5.1.1 Avantages

Par rapport à un système autonome, on gagne sur les points suivants :

- Exploitation de la totalité de l'énergie photovoltaïque issue des panneaux (le stockage est infini).
- Maintenance quasi inexistante (ce sont les batteries qui demandent le plus d'attention).
- Meilleure durée de vie du système. Cette solution est plus rentable que l'installation photovoltaïque totalement autonome, mais reste malheureusement encore très onéreuse en comparaison avec une alimentation électrique via le réseau. L'énergie produite par les modules est directement consommée sur place par les charges.

- Economie de l'ordre de 40% sur l'investissement (les batteries en moins).

II .5.2 Systèmes autonomes (isolée)

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter une ou plusieurs applications situées dans une zone isolée par rapport à un réseau électrique par :

- ✓ Alimentation autonome de produits grand public (lampes solaires ou bornes de jardin) par générateur photovoltaïque.
- ✓ Electrification de bâtiment (de quelque certains de watts à quelque KW) résidence secondaire, écoles et centres de santé dans les pays en développement par kits photovoltaïque (SHS).
- ✓ Alimentation d'applications professionnelles (de quelques dizaines de W à quelque KW), signalisation, télécom. (Moine Gérard, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) [60].

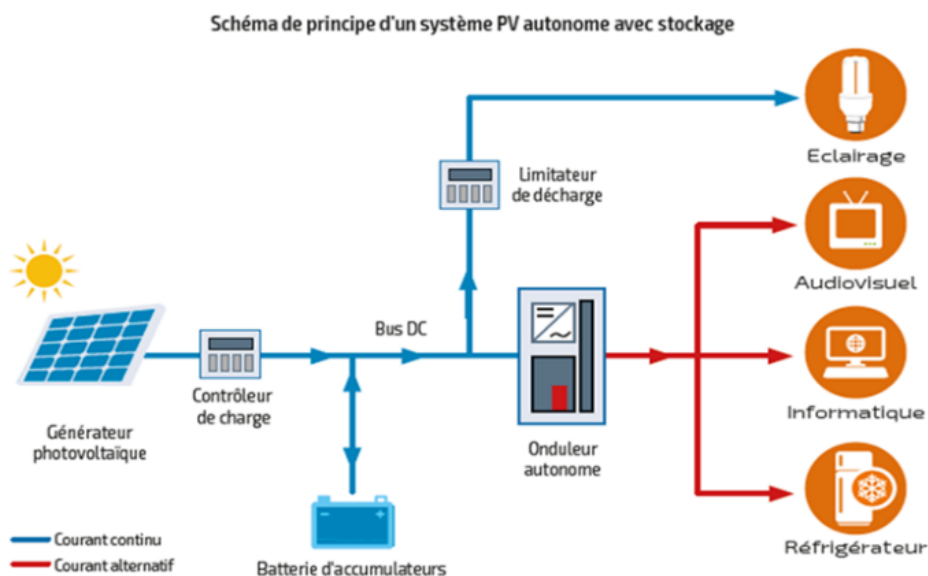


Figure II.11 : Schéma principe d'un système PV autonome [61].

II .5.3 Système injection ou réseau centralisé (centrale solaire photovoltaïque)

Les systèmes à grandes puissances sont des systèmes PV localisés à des endroits où l'alimentation est centralisée. Ils sont utilisés pour renforcer le réseau conventionnel durant les périodes de pic de puissance. Ces systèmes nécessitent des espaces très vastes (environ 2 hectares pour un 1 MW).

Les systèmes centralisés, également appelés centrales solaires photovoltaïques, sont des systèmes photovoltaïques de grande échelle qui produisent de l'électricité pour alimenter le réseau électrique national, ils sont généralement constitués de plusieurs milliers de panneaux photovoltaïques montés sur des supports au sol ou sur des toits [61].



Figure II.12 : centrale solaire photovoltaïque [61].

II.6 Utilisation de l'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique a de nombreuses applications comme le chauffage solaire des locaux, refroidissement solaire, chauffe-eau solaires collectifs.

II.6.1 Chauffage solaire des locaux

La chaleur collectée, portée par le fluide caloporteur, va circuler à travers le bâtiment et diffuser peu à peu sa chaleur par :

- ✚ **Le plancher solaire directe(PSD) :** un réseau de tuyaux parcourt le plancher et diffuse peu à peu la chaleur dans le bâtiment. Le réseau de distribution peut aussi être relié à une chaudière, le fluide caloporteur peut alors être stocké.
- ✚ **L'hydro accumulation :** l'énergie solaire est stockée au fur et à mesure qu'elle arrive dans un ballon de stockage (de 0.5 à 1 m³), et peut être utilisée pour le chauffage de l'eau ou le chauffage domestique.

II.6.2 Refroidissement solaire

Le solaire thermique peut aussi servir à refroidir des bâtiments, la technologie repose sur la réfrigération par absorption qui utilise la chaleur solaire pour faire fonctionner des refroidisseurs à absorption, et la compression est assurée par une pompe thermique. Cette technologie procure une climatisation sans émettre de CO₂ et adéquation entre disponibilité de l'énergie (ensoleillement) et besoins énergétiques (par temps chaud) [52].

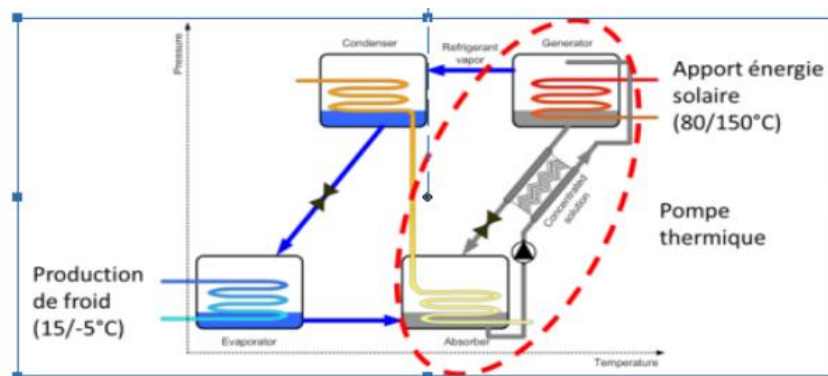


Figure II.13 : Principe du froid solaire [52].

II.6.3 Chauffe –eau solaires collectifs (CESC)

Les chauffe eau solaires, chauffent les grandes quantités d’eau nécessaires aux collectives comme les hôtels, les centres sportifs ou les hôpitaux ou à l’installation industrielles grandes consommatrices d’eau chaude sanitaires, aussi dans l’agro-alimentaire.

Une chauffe –eau solaires dit collectif lorsque la surface de l’absorbeur du capteur solaire vite dépasse (10m²) ou lorsque le volume du ballon solaire dépasse (500litres) [63].

II.7 Energies renouvelables dans l’Algérie

Selon la figure (II .14) d’ici à 2030, la production d’électricité dépend en grande partie de l’énergie solaire et éolienne, environ 40% de la production d’électricité destinée à la réalité ; les efforts doivent être intensifiés et le projet innovés. Bien qu’il s’agisse d’un investissement couteux, mais avec le temps il contribue au développement du pays, d’autant plus que L’Algérie dans les circonstances actuelles perd un grand pourcentage des énergies fossiles.

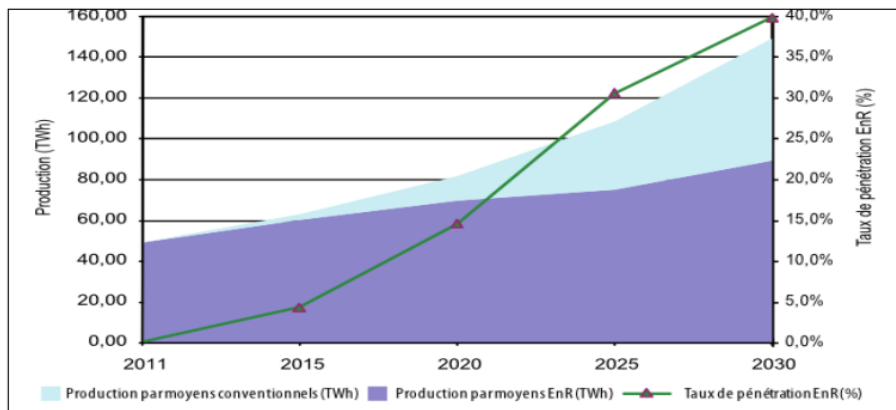


Figure II.14 : pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale en TWh [64].

II.8 Gisement solaire

Est un ensemble de dons dérivant l’évolution du rayonnement solaire disponible au cours d’une période donné. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d’un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [65].

II.8.1 Potentiel solaire mondiale

Concernant le potentiel solaire mondial chaque jour, le soleil offre théoriquement 10'000 fois plus d’énergie que le monde n’en consomme durant la même période.

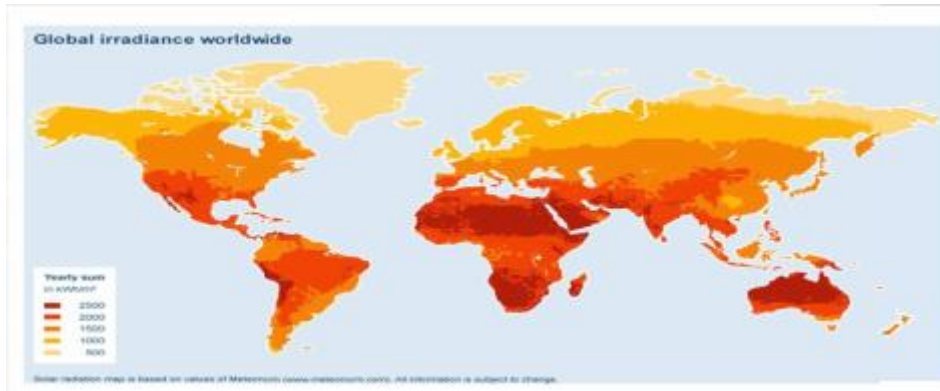


Figure II.15 : L'irradiation solaire annuelle mondiale [66].

II.8.2 Potentiel solaire en Algérie

De part géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m²/an au nord et 2263KWh /m²/an au sud du pays [68].

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie.

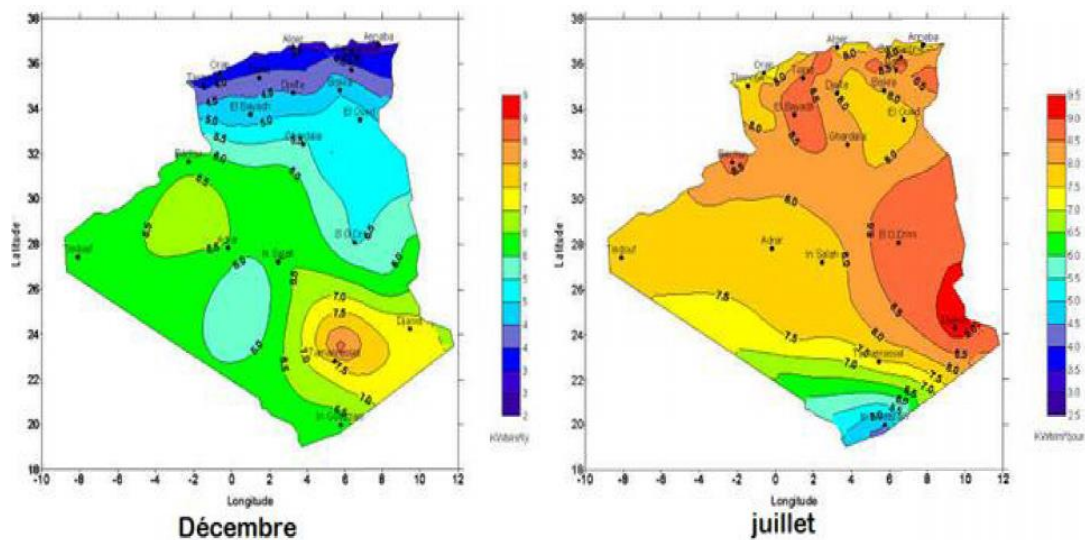


Figure II.16 : Le gisement solaire en Algérie [67].

Une évaluation par satellite, l'agence spatiale allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie posséd le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen.

Tableau II.2 : Le taux d'ensoleillement pour région d'Algérie [69].

Régions	Zones côtières	Hauts plateaux	Sahara
Domaine	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (heures /an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçues (KWh/m/an)	1700	1900	2650

II.9 Etude économique

L'intervalle de temps considéré par l'étude économique est le cycle de vie (Life Cycle shaving (LCS), c'est la durée de fonctionnement des modules au-delà des 80% de la puissance nominale, c'est -à-dire 25 ans [70] [71].

II.9.1 Evaluation du coût d'investissement initial

Pour le calcul du prix de revient de l'installation, on fait la somme des prix de chaque équipement ou accessoire utilisé, et cela quand on terminera ainsi que les divers appareillages intervenant lors de la mise en place de l'installation.

Le coût brut :

coût des modules PV

Le coût total des modules est donné par :

$$C_{\text{mod}} = N_{\text{mod}} * P_{\text{mod}} * \text{cout de We} \quad (\text{II. 13})$$

N_{mod} : est le nombre de module

P_{mod} : est la puissance d'un module

coût de l'onduleur

Le coût total des onduleurs est donné par :

$$C_{\text{ond}} = N_{\text{branche}} * P_{\text{ond}} * \text{cout de We} \quad (\text{II. 14})$$

N_{branche} : est le nombre des onduleurs

P_{ond} : est la puissance d'un onduleur

coût total de la centrale

Le coût global de la centrale PV, est la somme de tout le coût fixe mentionné précédemment :

$$C_{\text{TOTALE}} = C_{\text{MODE}} + C_{\text{ONDE}} + C_{\text{BATTERIES}} + \text{BOS} \quad (\text{II.15})$$

C_{mode} : coût des modules PV

C_{onde} : coût des onduleurs

$C_{\text{batteries}}$: coût des batteries

BOS : le coût annexe (des coûts supplémentaires associés à un projet), comme par exemple transport, la planification, aux études d'ingénierie et au montage de l'installation.

L'analyse économique qui permettra de déterminer le coût total du projet et le temps de retour sur investissement est faite sur la base de l'hypothèse suivante :

- ✓ coût de maintenance et d'exploitation est pris égal à 5% de l'investissement initial.
- ✓ La main d'œuvre est pris égale à 10% de l'investissement initial
- ✓ coût d'investissement initial
- ✓ Ce coût de remplacement de l'équipement

$$\text{cot total} = \text{inv} + \text{cout d'exp\&maint} + \text{main} - \text{d'Œuvre} + \text{cout de rem} \tag{II. 16}$$

Inv. : investissement initial

Coût d'exp & maint : coût d'exploitation et maintenance

Coût de rem : Coût de remplacement

main – d'œuvre: Coût des travailleurs nécessaires pour l'installation, l'entretien ou l'exploitation du système. Cela inclut les salaires, les charges sociales et autres dépenses liées aux employés.

II .10 Etude économique de l'investissement

La réalisation de centrale PV engendre des coûts, la méthodologie et les formules utilisées pour les calculs économiques sont présentées ci-dessous :

II.10.1 Calcul du coût total de la central PV (C_c)

Le coût d'investissement fait référence aux dépenses ponctuelles associées à l'installation de la centrale photovoltaïque. Dans le but d'estimer la viabilité d'un projet énergétique, il est important de calculer toutes les dépenses associées au projet.

La première étape de : l'analyse économique est le calcul du coût total du capital.

Le coût d'investissement calculé pour ce projet comprend :

le coût de la surface PV , le coût des onduleurs , le coût des transformateur élévateur , le coût du BOS (câblage électrique , compteur , protection , boites de jonction , armoires , appareillage de commutation , combinateurs , fusibles ,disjoncteurs et autres composants non électrique) le coût des travaux de génie civil et le cout du terrain.

La formule utilisée pour calculer le coût d'investissement est suivant :

$$C_c = \left(N_i \cdot N_s \cdot N_p \cdot \frac{P_{mstc}}{1000} \cdot C_{pv} \right) + \left(N_i \cdot \frac{P_{rated}}{1000} \cdot C_{inv} \right) +$$

$$+ (C_{transformer} \cdot P_{plantnom} \cdot 1000) + (BOS \cdot P_{plantnom} \cdot 1000) +$$

$$+ C_{c\&i} \cdot P_{plantnom} \cdot 1000) + (C_{land} \cdot n \cdot land) \tag{II. 17}$$

C_{pv} [€/KWC] est le coût des modules PV, P_{rated} [W] est la puissance nominale des onduleurs solaires et C_{inv} [€ / KWC] est le coût associé à la construction et à l'installation des composants de la centrale photovoltaïque, BOS [€/KWC] est le coût des composants de l'équilibre du système.

C_{land} [€/km²] et $land$ [km²] sont respectivement le coût du terrain et de la surface nécessaire à l'installation de la centrale PV, n [années] est la durée de vie opérationnelle de la centrale photovoltaïque.

C_c : Coût total du système (en euros).

N_i : Nombre d'installations ou d'unités.

N_s : Nombre de modules en série.

N_p : Nombre de chaînes en parallèle.

P_{mstc} : Puissance d'un module (en watts crête – WC).

$C_{c\&i}$: Coût de câblage et installation (€/kW)

N : Nombre d'unités de terrain utilisées.

II.10.1.1 Calcul du Coût de maintenance de la centrale photovoltaïque pendant sa durée de vie (C_m)

En plus de connaître le coût total du capital de la centrale PV, le calcul du coût de maintenance pendant la durée de vie opérationnelle est important pour connaître le cadre économique du projet. La formule utilisée pour ce paramètre est présentée ci-dessous :

$$C_m = P_{plantnom} * n * M_{plantnom} * 1000 \quad (II. 18)$$

Où, M_{plant} [€/KWC] est le Coût de maintenance de la centrale photovoltaïque. $P_{plantnom}$ Puissance nominale de la centrale photovoltaïque. Le taux d'inflation annuel et l'actualisation nominale ne sont pas pris en compte dans ce calcul en raison du manque de données réalistes, mais pour une valeur plus précise de C_m , ces valeurs doivent être examinées attentivement.

II.10.1.2 Calcul du coût de remplacement (C_{rep})

Certains des composants installés dans la centrale photovoltaïque devront être remplacés au cours des années d'exploitation. La durée d'exploitation de la centrale photovoltaïque en cours de conception est 25 Ans, la décision concernant les composants à remplacer sera prise en fonction de la spécification de chaque composant.

II.10.1.3 Calcul du coût actualisé de l'énergie (LCOE)

Le LCOE (Levelized Cost Of Energy) est un paramètre économique qui sert à quantifier le prix de l'énergie produite dans les conditions spécifiques décrites précédemment. C'est également l'un des principaux paramètres permettant de

comparer différentes technologies de production. La formule utilisée dans ce projet est la suivante :

$$LCOE = \frac{C_c + C_m + C_{rep}}{P_{plantn} * 1000} \quad (II. 19)$$

Ou, E_{plant} [MWh] est l'énergie totale produit par centrale photovoltaïque sur sa durée de vie opérationnelle.

C_c : Coût initial d'investissement total du système (en €).

C_m : Coût total de maintenance sur toute la durée de vie (en €).

C_{rep} : Coût de remplacement d'équipements (ex. : onduleurs, batteries...)

1000 : Facteur de conversion de MW vers kW (car le LCOE est souvent exprimé en €/kWh).

II.10.1.4 Revenus Bruts (R_{gross})

Les revenus bruts sont la somme de tous les revenus générés par la centrale photovoltaïque pendant la durée de vie du projet. Le calcul est effectué en tenant compte du prix de l'électricité pendant la durée de vie de l'installation photovoltaïque. Ce prix peut varier en fonction du marché de l'électricité de l'endroit choisi et il est également important de prendre en compte les programmes de soutien disponibles. La formule utilisée pour les revenus bruts est la suivante :

$$R_{gross} = P_{electricity} * E_{planttot} * n \quad (II. 20)$$

Ou, $P_{electricity}$ [€/MWh] est le prix de l'électricité pour la durée de vie opérationnelle de la centrale photovoltaïque.

$E_{planttot}$: Production annuelle d'énergie de la centrale (en kWh ou MWh).

n : Durée de vie ou nombre d'années de fonctionnement de la centrale.

II .10.1.5 Calcul de paramètres de d'évaluation

Les paramètres qui vont être décrits ci-dessous peuvent être considérés des indicateurs de qualité de la centrale solaire PV conçue, Ces paramètres peuvent également être utilisés pour prendre des décisions finales concernant la technologie utilisée et pour effectuer des comparaisons entre d'autres types de technologie de production d'énergie. Les paramètres décrits dans cette section sont : le taux de couverture du sol, le taux de performance, le facteur de capacité et le rendement spécifique.

II.10.1.5.1 Taux de couverture du sol (GCR)

Ce paramètre est un indicateur de la façon dont la surface de l'installation est couverte par les modules PV et quel pourcentage est utilisé pour les autres composant. La formule de calcul de ce paramètre est présentée ci-dessous

$$GCR(\%) = \frac{S_{arrayfinal}}{land} * 100 \quad (II. 21)$$

Les résultats obtenus par le GCR seront indicatifs, puisque le calcul des lands [km²] est basé sur des hypothèses.

S_{arrayfinal} : Surface occupée par les modules photovoltaïques (en m²).

land: Surface totale de terrain disponible ou utilisée (en m²).

II .10.1.5.2 Performance ratio (PR)

Le ratio de performance exprime la relation entre la performance réelle de la centrale solaire photovoltaïque et sa capacité de puissance nominale. Ce paramètre peut être considéré comme un indicateur de qualité car il est généralement utilisé pour comparer différents systèmes photovoltaïques indépendamment de leur capacité installée. La période analysée est d'un an et le paramètre est calculé par la formule suivante :

$$PR (\%) = \frac{E_{planttot}}{P_{plantnom} * 10^{-6} * G_t} * 100 \quad (II. 22)$$

Où, $E_{planttot}$ [MWH] est l'énergie totale produite par la centrale PV pendant une année. G_t : Irradiation solaire globale reçue sur le plan des modules pendant la même période (en kWh/m²). $P_{plantnom}$: Puissance nominale de la centrale photovoltaïque (en W) [70] [71].

II .10.1.5.3 Facteur de capacité (CF)

Ce paramètre est le rapport entre la production d'énergie réelle de la centrale PV pendant une année et sa production à la puissance optimale pendant une année. Il est généralement exprimé en pourcentage et la formule décrivant ce paramètre est présentée ci-dessous :

$$CF(\%) = \frac{E_{planttot}}{P_{plantnom} * 8640} * 100 \quad (II. 23)$$

II .10.1.5.4 Rendement spécifique (yied_{sp})

Le rendement spécifique d'une centrale solaire PV est la production totale d'énergie divisée par la capacité installée. Ce paramètre exprime le nombre d'heures pendant lesquelles le champ photovoltaïque devait fonctionner à sa puissance nominale pour produire la même énergie. La formule utilisée est présentée ci-dessous, les résultats peuvent être exprimés en KWH/KWC ou en heures [70] [71].

$$yied_{sp} = \frac{E_{total}}{P_{plantnom}} \quad (II. 24)$$

E_{total} :Énergie totale produite par l'installation sur une période (en kWh).

II .11 Types de Panneaux Solaires

Le tableau II.3 représente les différents types de panneau solaires.

Tableau II. 3 : type de panneau solaire [58].

Type de panneau solaire :	Efficacité :	Avantage :	Inconvénient :
Monocristallin	20-22%	Haute performance, résistant à la chaleur	Coût plus élevé
Poly cristallin	15-18%	Moins cher, fiable	Moins efficace en forte chaleur
Bifacial	22-25%	Absorbe aussi la lumière réfléchie	Plus cher, nécessite un bon support

II.12 Glossaire des innovations technologiques dans le domaine de l'électricité

Dans le monde en constante évolution de l'électricité, plusieurs innovation technologique sont sur le devant de la scène et transforment notre façon de produire, de consommer et de gérer l'énergie. Voici un aperçu de ces avancées fascinantes :

- 1- **Smart grid** : Ce terme désigne les réseaux électrique intelligents qui utilisent des technologies avancées pour améliorer la gestion de la distribution de l'énergie.
Grâce à la communication entre les consommateurs et les fournisseurs, on peut optimiser la consommation et réduire les pertes d'énergie.
- 2- **éoliennes offshore** : Les éoliennes installées en mer représentent une avancée significative dans la production d'énergie, en capturant les vents puissant des océans, elles génèrent de grandes quantités d'électricité enroulable.
- 3- **Trains à énergie solaire** : ces trains innovant fonctionnent grâce à des panneaux solaires intégrés réduisant ainsi leur dépendance à l'énergie fossile tout en fournissant un moyen de transport durable.
- 4- **Panneaux solaires à base de déchets alimentaires** : Il s'agit d'une technologie innovante qui utilise des déchets alimentaires pour produire des panneaux solaire efficaces. Cela permet non seulement de générer de l'énergie, mais aussi de réduire le gaspillage alimentaire.
- 5- **énergies éolienne sans pale** : Ces turbines révolutionnaires captent l'énergie du vent sans l'usage de pales. Cela réduit à la fois l'impact visuel et le bruit associés à l'éolien traditionnel.
- 6- **Supraconducteur** : Ces matériaux permettent de transporter l'électricité sans aucune perte d'énergie. Ils ouvrent la voie à un avenir énergétique plus efficace et moins coûteux.
- 7- **stockage d'électricité par inertie** : Cette méthode utilise le mouvement mécanique pour stocker l'énergie. En transformant l'énergie électrique en énergie cinétique, on peut l'utiliser lorsque la demande est élevée.

- 8- **station de pompage (STEP)** : elles fonctionnent en pompant de l'eau d'un réservoir inférieur vers un supérieur lors des périodes de faible demande , puis en la relâchant pour produire de l'électricité lors des pics de consommation .
- 9- **batteries Lithium-Ion** : ces types de batteries sont couramment utilisés dans les appareils électroniques et les véhicules électrique en raison de leur haute capacité de stockage et de leur longue durée de vie.
- 10- **Domotique** : elle englobe toute la technologie permettant le contrôle et la gestion à distance de l'équipement électrique dans nos maisons. Ca inclut l'éclairage, le chauffage, et même la sécurité, rendant notre vie plus pratique et économe en énergie.
- 11- **E-tree** : un arbre solaire multifonction qui produit de l'électricité grâce à ses feuilles photovoltaïque. Il fournit à la fois de l'énergie et un ombrage agréable dans les espaces public.
- 12- **Recharge sans fil** : une technologie émergente qui permet de recharger des appareils électrique sans avoir à utiliser des câble .pratique et moderne, elle facilite notre quotidien
- 13- **Stockage chimique** : ce processus utilise des réactions chimiques pour stocker l'énergie, permettant une libération d'électricité ultérieure de manière contrôlée.
- 14- **Piles a Hydrogéné** : ces dispositifs utilisent l'hydrogéné comme source d'énergie produisant de l'électricité et ne rejetant que de l'eau comme sous – produit, une alternative prometteuse pour un venir décarbonné.
- 15- **Taux d'auto – consommation** : ce terme se réfère à la quantité d'électricité produite par un système (comme le panneau solaire) qui est utilisé directement par le propriétaire, diminuant ainsi sa dépendance au réseau électrique [72].

II .13 Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'étude des énergies renouvelables. La première partie de ce chapitre commence par donner un aperçu sur les énergies renouvelables et sur la production des énergies renouvelable au niveau mondiale et en Algérie.

Ce chapitre présente aussi l'avantage des énergies renouvelable et explique la production d'énergie solaire photovoltaïque d'une façon particulière.

Chapitre III
Simulations et résultats

III.1 Introduction

Les conditions climatiques en Algérie sont favorables au développement de l'énergie solaire en raison de l'ensoleillement abondant tout au long de l'année, en particulier dans la région du Sahara.

Avec cette énorme quantité de rayons de soleil par an, l'Algérie est l'un des pays où le rayonnement solaire est le plus élevé au monde.

Des études par Sonelgaz seront menées pour détecter les sites appropriés pour réaliser les projets prévus restants sur la période 2016-2030 pour une puissance totale d'environ 1700 MW. Cette stratégie devrait permettre de diminuer la part des combustibles fossiles (gaz naturel et pétrole) qui sont actuellement la principale ressource pour la production d'électricité du pays. De plus, l'utilisation des ressources renouvelables comme le vent, le solaire et la géothermie, vont permettre de répondre à la demande croissante d'énergie, mais aussi de faire face au tarissement de ces sources fossiles.

Ce travail représente une étude sur l'insertion du parc photovoltaïque dans le réseau Algérien (Béchar, Djelfa, el oued, Ghardaïa). Le réseau Algérien est retenu pour étude et différents cas ont été simulés dans un outil puissant de simulation qui est le Power System Analyse Toolbox (PSAT).

Dans ce chapitre, notre étude cherchera à traiter les problèmes du réseau Algérien et trouver des solutions technico – économique pour renforcer la qualité d'alimentation.

III.2 Logiciel PSAT

Le logiciel PSAT (Power System Analysis Toolbox) est un logiciel destiné à l'analyse et l'étude des réseaux électrique.

Il est développé sous MATLAB par Mr. Federico Milano, PSAT est une boîte à outils qui dédiée pour l'analyse statique, l'analyse dynamique tel que le contrôle des réseaux électriques.

Le logiciel PSAT a plusieurs interfaces graphiques, il inclut l'écoulement de puissance basé sur la méthode de Newton Raphson [76].

PSAT

Power System Analysis Toolbox

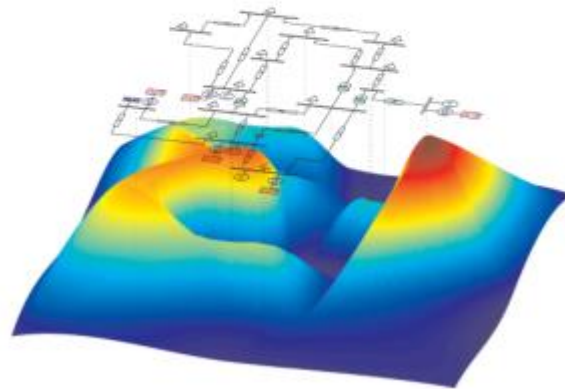


Figure III.1 : Interface graphique de PSAT

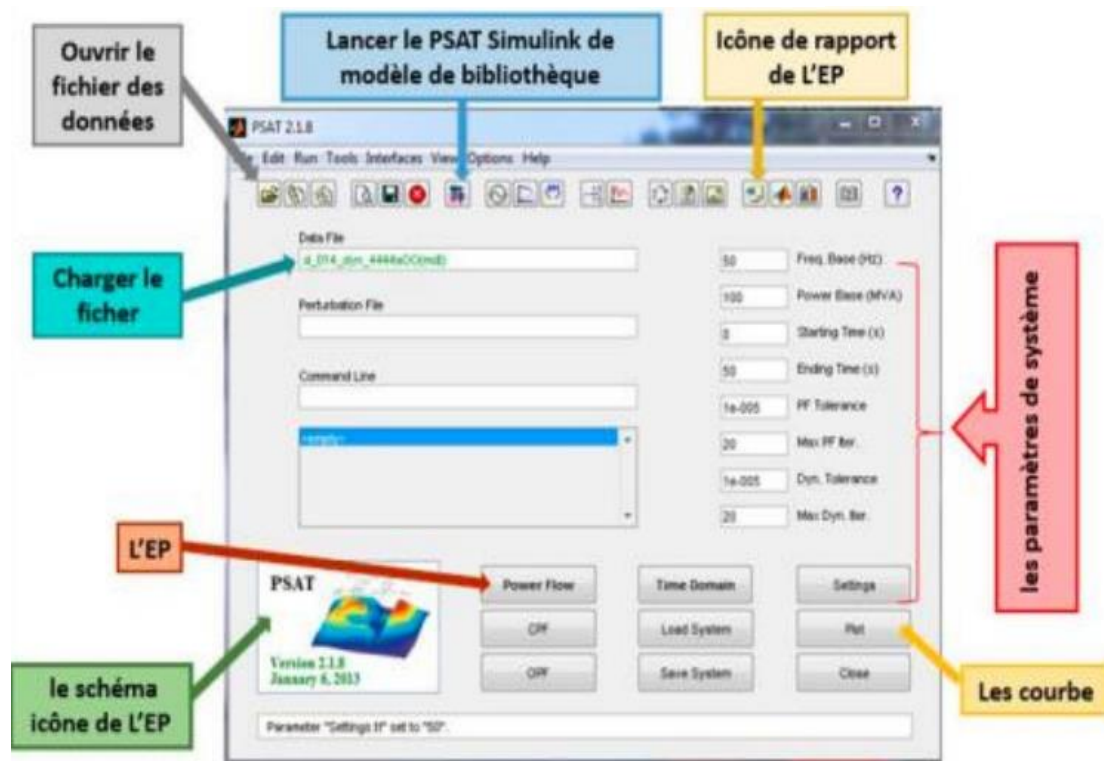


Figure III.2 : fenêtre d'accueil de PSAT [76].

III.2.1 Méthodes d'analyse

PSAT utilise la méthode de Newton –Raphson pour résoudre l'écoulement de puissance dans le réseau électrique.

Cette méthode itérative permet de calculer les tensions, les angles de phase et les flux de puissance dans le réseau. PSAT peut également effectuer d'autres analyses statique et dynamique, comme l'analyse de stabilité des petits signaux et la simulation temporelle [77].

Le logiciel offre des fonctions d'optimisation, notamment l'écoulement de puissance optimal(OPF) et l'écoulement de puissance continu (CPF), permettant d'optimiser le fonctionnement du réseau [77].

III.2.2 Avantage de PSAT

- ✚ Interface facile à utiliser.
- ✚ Résultats précis basés sur des méthodes mathématiques.
- ✚ Outil idéal pour les ingénieurs, chercheurs et entreprises.

III.2.3 Utilisation de PSAT pour un projet photovoltaïque à Béchar

L'application de PSAT dans un projet à Béchar permettrait de :

- Déterminer le meilleur emplacement de la centrale photovoltaïque.
- Optimiser la production pour maximiser le rendement.
- Analyser l'impact de la centrale photovoltaïque sur la qualité d'énergie du réseau Algérien.
- Evaluer la viabilité économique d'une centrale solaire à Béchar [73].

III.3 Étude de la centrale photovoltaïque à Béchar

III.3.1 Présentation de la région de Béchar

Béchar est une ville située au sud-ouest de l'Algérie, dans une zone désertique caractérisée par un climat aride et un ensoleillement abondant. C'est une région idéale pour le développement du photovoltaïque.

III.3.2 Potentiel solaire de Béchar

- Béchar bénéficie de plus de 3000 heures d'ensoleillement par ans.
- La région dispose de grands espaces disponibles pour des projets solaires à grande échelle.
- Température moyenne : 30-40°C en été, favorisant une production énergétique stable

- Disponibilité de l'espace : Béchar dispose de grandes surfaces désertiques adaptées à l'installation de fermes photovoltaïques [74].

III.3.3 Projets photovoltaïques existants

Actuellement, Béchar bénéficie de plusieurs projets liés au photovoltaïque :

- Installation de mini-centrales solaires pour l'électrification des zones rurales.
- Développement de panneaux solaires pour l'autoconsommation dans certaines habitations.
- Projets en partenariat avec des investisseurs étrangers pour la construction de grandes centrales photovoltaïques.
- Une centrale solaire expérimentale a été installée pour tester la viabilité du photovoltaïque à Béchar [78].

III.4 Présentation du réseau Algérien

Dans cette étude, nous allons utiliser le réseau Algérien de transport de l'énergie électrique. Ce réseau est composé de 114 nœuds, 157 lignes, 16 transformateurs et 15 générateurs. La topologie du réseau utilisé est présentée dans la figure (III.3).

Avec la forte croissance de la demande électrique durant ces dernières années et les grandes distances entre le système électrique, de 200 à 100 km, l'alimentation des régions sud isolées pose des problèmes technique et économique sérieux [75].

Afin d'améliorer le fonctionnement du réseau de transport Algérien, plusieurs solutions ont été envisagées par la Sonalgaz soit par la construction des nouvelles lignes comme la ligne de Saida –Naama et la ligne de Naama –Béchar, ou il n'y a pas de source locale de combustible, une étude faite par la Sonal gaz montre la nécessité d'interconnecter cette région avec le réseau national par le biais d'une ligne Saida – Béchar via Ain sefra (Naama) de 250km a 220kv.

Cette ligne radiale qui prend son départ de la sous –station de saida est constituée d'une seule ligne de section 411 mm^2 entre saida et ain –sefra (270km) et une double ligne entre Ain-sefra et Bechar (250km) [75].

En effet, le logeur importante de ces lignes de transportes entraine d'apparition des pertes de transmission dans le réseau électrique.

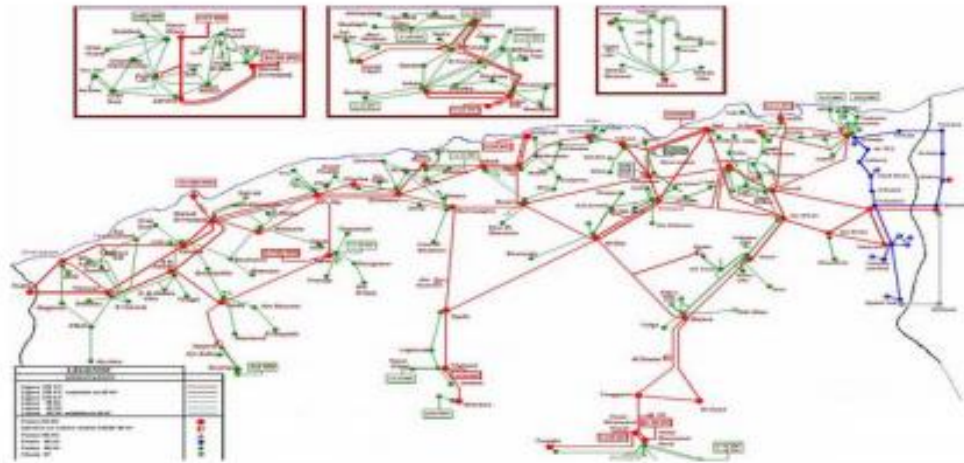


Figure III .3 : Réseau Algérien 114 nœuds [75].

Tableau III.1: Données des nœuds de régulation du réseau Algérien [75].

Numéro du nœud	Nom du nœud	Module de tension (p.u)	Q_{\min} (MVar)	Q_{\max} (MVar)
5	MERSAT EL HADJADJ 2	1.0500	20	200
11	TIARET	1.0500	-50	100
15	RAVIN BLAN	1.0400	0	100
17	ALGER EST 1	1.0800	0	400
19	ALGER PORT	1.0300	0	60
22	BAB EZZOUAR	1.0400	0	50
52	BOUFARIK	1.0500	0	50
80	EL HADJAR 1	1.0800	0	60
83	SKIKDA	1.0500	-50	200
98	DARGUINA	1.0500	0	50
100	JIJEL	1.0800	0	270
101	M'SILA	1.0800	-50	200
109	TILGHEMT	1.0500	-50	100
111	H.MESSOUD NORD	1.0200	-50	155

III.4.1 Résultats de simulation sur le réseau Algérien

Pour déterminer tous les problèmes de ce réseau réel, le flux de puissance est calculé par la méthode de Newton Raphson qui nous permet de trouver les pertes actives et réactives dans les lignes de transmission, la génération totale, les pertes totales du réseau et le profil de tension dans les différents nœuds.

La première étape de cette étude est la modélisation du réseau Algérien à l'aide de PSAT/MATLAB, basée sur les données du système incluant les générateurs, les charges, les lignes et l'autre équipement.

Toutes les opérations peuvent être effectuées à l'aide de l'interface graphique de l'utilisateur et de l'éditeur graphique du réseau avec une bibliothèque Simulink capable de modéliser de grands systèmes de puissance et de comparer plusieurs dimensions du réseau électrique.

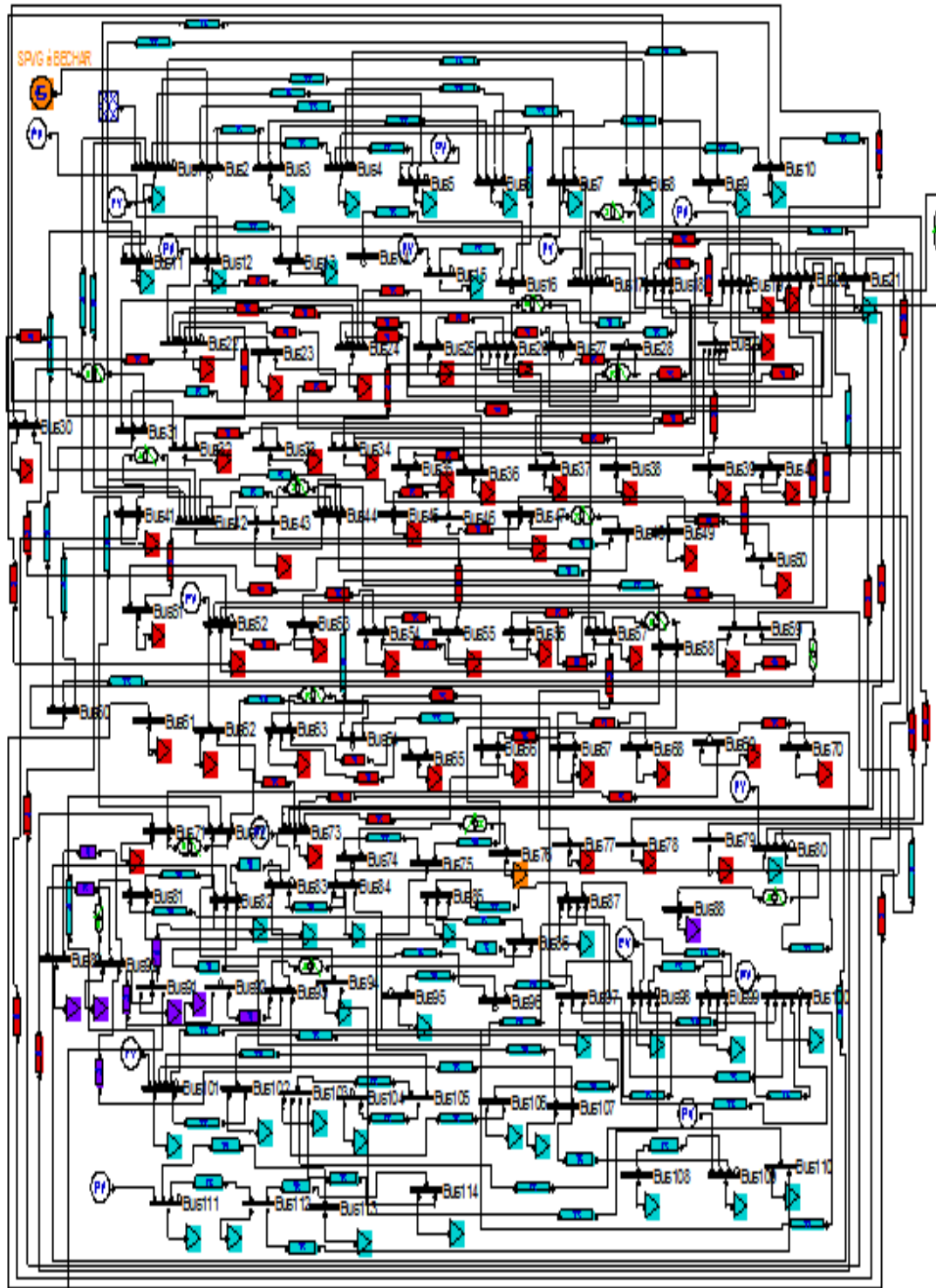


Figure III.4 : le réseau Algérien inséré dans PSAT.

Tableau III.2: Résultats des puissances générées et des pertes globales du réseau Algérien

Générations totales		Charges totales		Pertes Totales	
P_G (MW)	Q_G (MVar)	P_c (MW)	Q_c (MVar)	P_L (MW)	Q_L (MVar)
3695.085	1900.708	3627	2070	68.0852	-169.292

D'après les résultats dans le tableau (III.2), les productions totales de puissance active P_G et réactive Q_G sont respectivement 3695.085MW et 1900.708MVar.

Les pertes totales de puissance active P_L et réactive Q_L obtenues par cette méthode sont respectivement 68.0852MW et -169.292MVar.

Figure (III.5) et (III.6) représentent respectivement les allures des flux de puissance active et réactives du réseau Algérien.

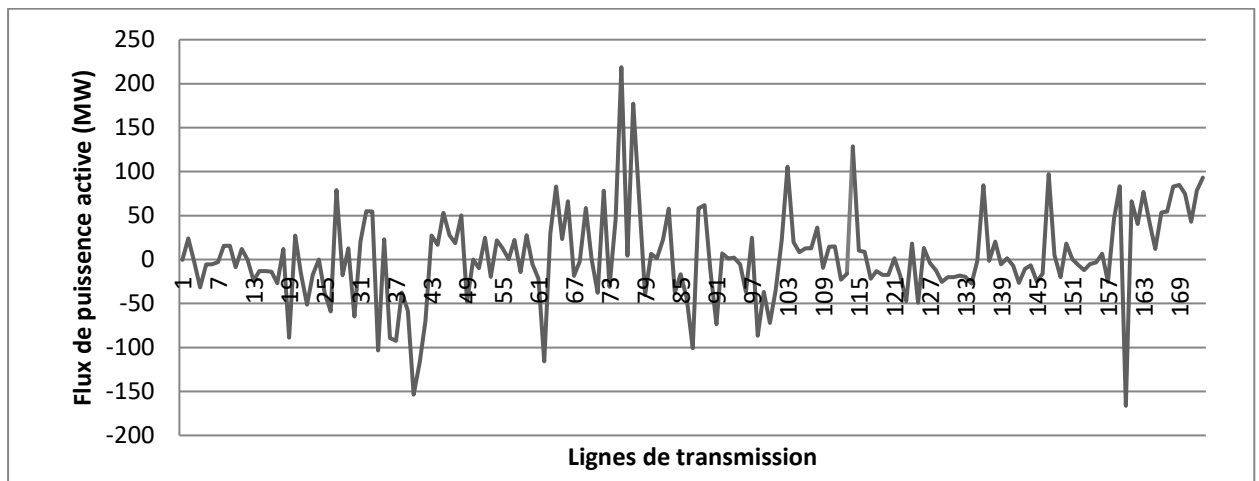


Figure III.5 : Flux de puissance active du réseau Algérien.

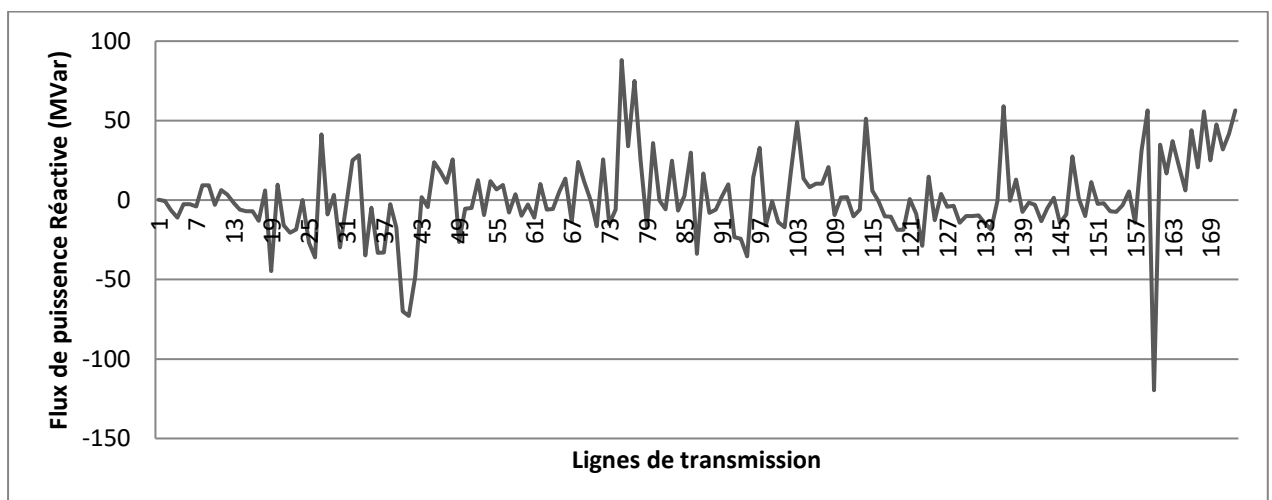


Figure III.6 : Flux de puissance réactive du réseau Algérien.

III.4.2 Analyse et discussion

Les figures (III.7) et (III.8) ont été utilisées pour identifier les lignes responsables des pertes les plus importantes dans le réseau. En analysant les courbes des pertes actives et réactives représentées dans ces figures, il apparaît clairement que le réseau présente un problème significatif de pertes actives et réactives au niveau des lignes suivantes :

- Ligne N°40 : AIN MLILA-JIJEL (noeud87-100)
- Ligne N°62 : DJELFA-TILGHEMT (neoud107-109)
- Ligne N°75 : ALGER EST 1 – LARBAA2 (nœud 17-21)
- Ligne N°87 : BUOIRA2 – M4SILA (nœud 72-101)
- Ligne N°103 : MERSAT EL HADJADJ1-OUED SLY2 (nœud 1-42)
- Ligne N°77 : ALGER EST 1 –OULED FAYET 2(nœud 17-30)
- Ligne N°34 : EL KHHAROUB –SKIKDA (nœud 82-83)
- Ligne N°64 : TOUGGOURT-H.MESSAOUD NORD (nœud 112-111)
- Ligne N°30 : EL AOUNET –EL KHROUB nœud (81-82)
- Ligne N°19 : AIN BEIDA-AIN MLILA (nœud 85-87)
- Ligne N°73 : BECHAR-AIN SEFRA (nœud 12-13)
- Ligne N°74 : SAIDA – AIN SEFRA (nœud 10-13)

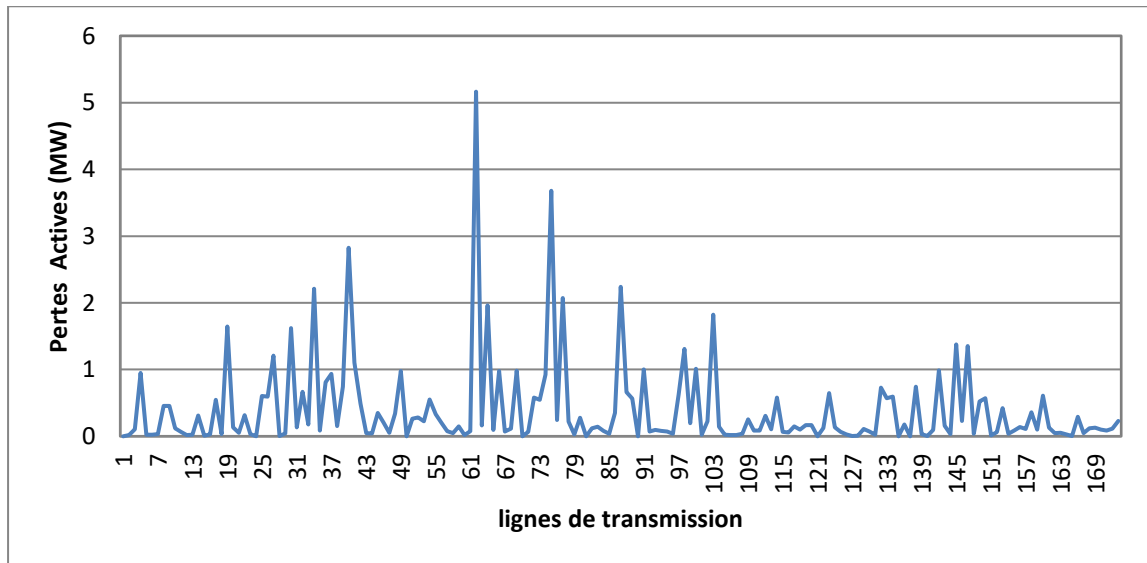


Figure III.7 : Pertes Actives dans les lignes de transmission de réseau Algérien.

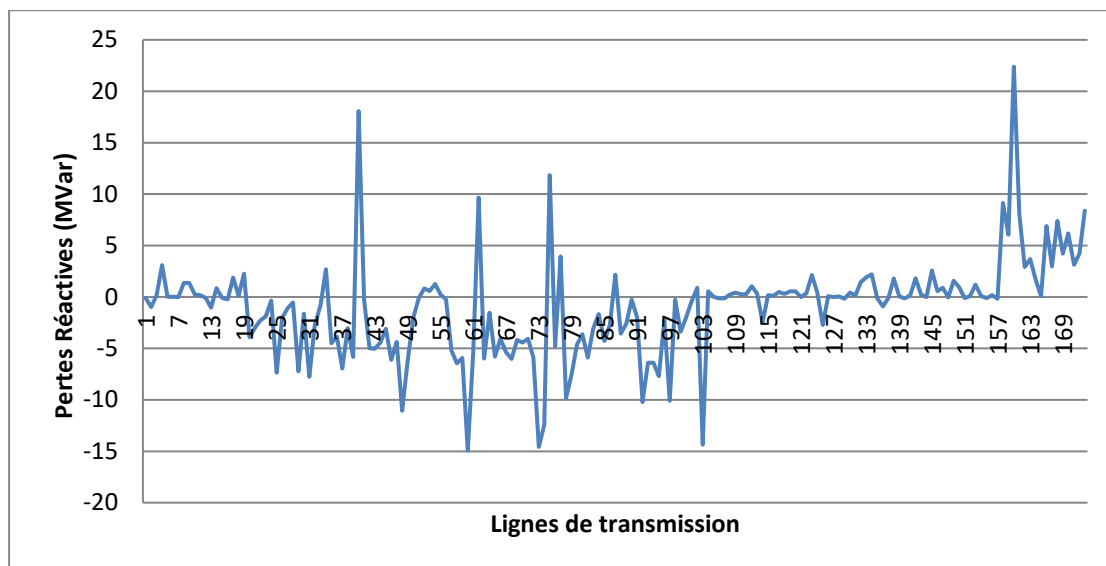


Figure III.8 : Perte réactive dans les lignes de transmission de réseau Algérien.

La figure (III.9) illustre les amplitudes de tensions des différents nœuds du réseau Algérien. D'après une première lecture de cette figure, nous remarquons que le réseau a un problème de chute de tension au niveau des nœuds suivant :

- Ligne N°54 : EL AFFROUN (0,894758465046433p.u)
- Ligne N°55 : CHERCHEL (0,877554658743423p.u)
- Ligne N°56 : MEDEA (0,876158132351746p.u)
- Ligne N°89 : SOUK AHRAS (0,893132158808572p.u)
- Ligne N°91 : TEBESSA 2 (0,884589281132174p.u)
- Ligne N°92 : DJEBEL ONK (0,865956237960814p.u)

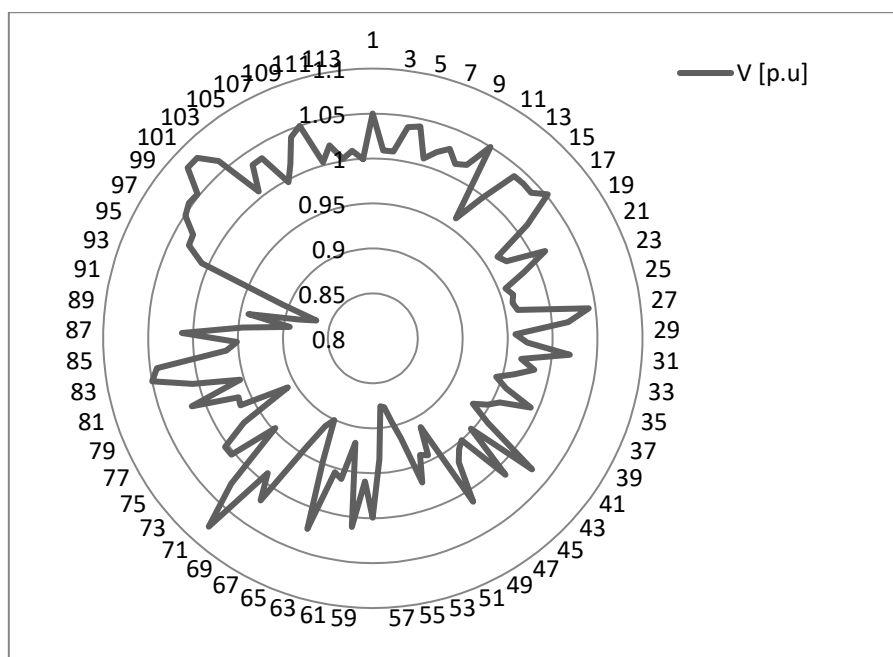


Figure III.9 : Amplitude de tensions en (p.u) des nœuds du réseau Algérien.

III.5 Insertion du générateur photovoltaïque au réseau Algérien

Pour assurer un bon fonctionnement de tout système alimenté par l'énergie solaire photovoltaïque, il est nécessaire de connaître le potentiel solaire de l'emplacement.

Le choix de l'emplacement du générateur solaire photovoltaïque (PHV) est conditionné par les conditions climatiques du site sur la base des résultats des études de potentiels solaires menées par le ministère de l'Energie.

Les endroits les plus ensoleillés du réseau Algérien sont : GHARDAIA, BECHAR, EL OUAD et DJELFA. Pour trouver l'emplacement optimal du générateur photovoltaïque (PHV), on s'intéressera à l'insertion de ce dernier dans les sites les plus ensoleillés du réseau Algérien, en gardant les mêmes paramètres de PHV, puis on sectionnera l'emplacement qui donne les pertes totales du réseau les plus faibles après l'analyse de l'écoulement de puissance du réseau.

Un générateur photovoltaïque de 25 MW et tension de référence 1.045 p.u est choisie pour effectuer des études pour quatre sites différents :

- **Ghardaïa** : latitude 32° , 4, longitude 3° , 8, et l'irradiation normale directe quotidienne est $6\text{KWh/m}^2/\text{jour}$.
- **BECHAR** : latitude 31° , 7, longitude -2° , 3, et l'irradiation normale directe quotidienne est $6.8\text{KWh/m}^2/\text{jour}$.
- **EL OUED** : latitude 33° , 5, longitude 6° , 8, et l'irradiation normale directe quotidienne est $5.6\text{KWh/m}^2/\text{jour}$.
- **DJELFA** : latitude 34° , 7, longitude 3° , 2, et l'irradiation normale directe quotidienne est $6\text{KWh/m}^2/\text{jour}$.

Le tableau (III.3) résume les résultats du flux de puissance par la méthode de Newton Raphson des quatre emplacements de la générateurs photovoltaïque PHV (25MW) dans le réseau Algérien.

D'après le tableau on voit que l'emplacement de le générateur photovoltaïque au nœud N°12 (BECHAR) donne les pertes et les productions les plus faibles, comparé à l'autre emplacement, car ce nœud est relativement éloigné des unités de production.

Les centrales photovoltaïques implantées à Ghardaïa, El Oued et Djelfa sont situées à proximité des zones de production thermique. Cette proximité entraîne une surconcentration de la production électrique dans une même zone géographique, ce qui engendre une surcharge locale du réseau de transport. Par conséquent, cela provoque des pertes supplémentaires par effet Joule sur les lignes, en comparaison avec une région comme Béchar, où la production est plus dispersée ou mieux équilibrée géographiquement.

Tableau III.3 : Résultats des différents emplacements du générateur photovoltaïque PHV (25MW).

	Générations Totales		Pertes Totales	
	$P_G(\text{MW})$	$Q_G(\text{MVar})$	$P_L(\text{MW})$	$Q_L(\text{MVar})$
Cas de base	3695.0852	1900.7077	68.0852	-169.2923
PHV à BECHAR	3692.276	1886.192	65.27592	-183.808
PHV à GHARDAIA	3698.9445	1920.0156	71.9445	-149.9844
PHV à EL OUED	3696.0969	1903.0399	69.0969	-166.9601
PHV à DJELFA	3695.5195	1901.7341	68.5195	-168.2659

Le générateur PHV connectée à BECHAR injecte une puissance active de 25MW et une puissance réactive de 5.1954 MVar.

D'après les résultats illustrés dans le tableau (III.3), le PHV de BECHAR (25MW) diminue les pertes actives totales de 68.0852 MW à 65.27592 MW et les pertes réactives totales de -169.2923 MVar à -183808MVar

La puissance photovoltaïque diminue la génération thermique active totale du système de 3695.0852 MW à 3692.276 MW, et la génération thermique réactive totale de 1900.7077 MVar à 1886.192MVar. Selon l'étude du flux de puissance du réseau Algérien avec l'intersection de l'énergie solaire photovoltaïque, on peut dire que le site idéal de la PHV est au niveau de la région de BECHAR.

Après avoir choisi le nœud de BECHAR comme un emplacement optimal du générateur photovoltaïque, dans la partie suivante le flux de puissance du réseau Algérien est résolu avec différentes capacités du générateur photovoltaïque, pour avoir l'effet de la puissance solaire photovoltaïque sur le réseau Algérien. Dans cette partie du travail, on va évaluer les pertes actives et réactives totales du réseau pour différentes capacités du générateur photovoltaïque.

La capacité optimale de la générateur photovoltaïque est celle qui correspond aux pertes actives et réactives les plus faibles. D'après le tableau (III.4) les pertes totales du réseau diminuant avec l'augmentation de la capacité solaire photovoltaïque de 20MW jusqu'à 50MW. Au-delà, les pertes et les productions totales du réseau commencent à augmenter mais restent toujours inférieures au cas de bas.

Donc la capacité optimale du générateur connecté à BECHAR est 50MW. Dans ce cas, la puissance réactive injectée Q_{SPVG} égale à 0.12566MVar.

D'après les résultats illustrés dans le tableau (III.4), le générateur photovoltaïque à Béchar (50MW) participe efficacement à la réduction des pertes actives totales avec un profit de 2.9368 MW et des pertes réactives totales avec un profit de 17.01 MVar.

Le générateur photovoltaïque peut diminuer la génération thermique active totale du système jusqu'à 3692.1484 MW, et la génération thermique réactive totale jusqu'à 1883.6977 MVar.

Tableau III.4 : Pertes actives et réactives totales du réseau pour différentes capacités de la ferme SPV.

Paramètre	Sans SPVG	P _{SPVG} = 20MW	P _{SPVG} = 25 MW	P _{SPVG} = 30 MW	P _{SPVG} = 40 MW	P _{SPVG} = 50 MW	P _{SPVG} = 60 MW	P _{SPVG} = 70 MW	P _{SPVG} = 100 MW
P _G (MW)	3695,0852	3693,139	3692,8305	3692,581	3692,2536	3692,1484	3692,2593	3692,5814	3694,7932
Q _G (MVar)	1900,7077	1898,038	1886,6621	1885,5239	1884,0751	1883,6977	1884,3614	1886,0445	1897,1056
P _L (MW)	68,0852	66,139	65,8305	65,581	65,2536	65,1484	65,2593	65,5814	67,7932
Q _L (MVar)	-169,2923	-181,9162	-183,3379	-184,4761	-186,3023	-185,836	-185,636	-183,9555	-172,8944
Q _{SPVG} (MVar)		6,6077	5,1954	3,9191	1,7643	0,12566	-1,01	-1,6518	-0,64857

La figure (III.10) illustre l'influence de la fermes PV (50MW) connecté à BECHAR sur le profil de tension du réseau Algérien.

Pour mieux visualiser l'influence de l'énergie photovoltaïque sur le système, le tableau (III.5) présente les amplitudes de tensions (en p.u) des nœuds avant et après l'insertion de la centrale PV. Les figures (III.11) et (III.12) illustrent les pertes actives et réactives dans toutes les lignes du réseau avant et après l'insertion de la centrale SPV de 50MW à Béchar.

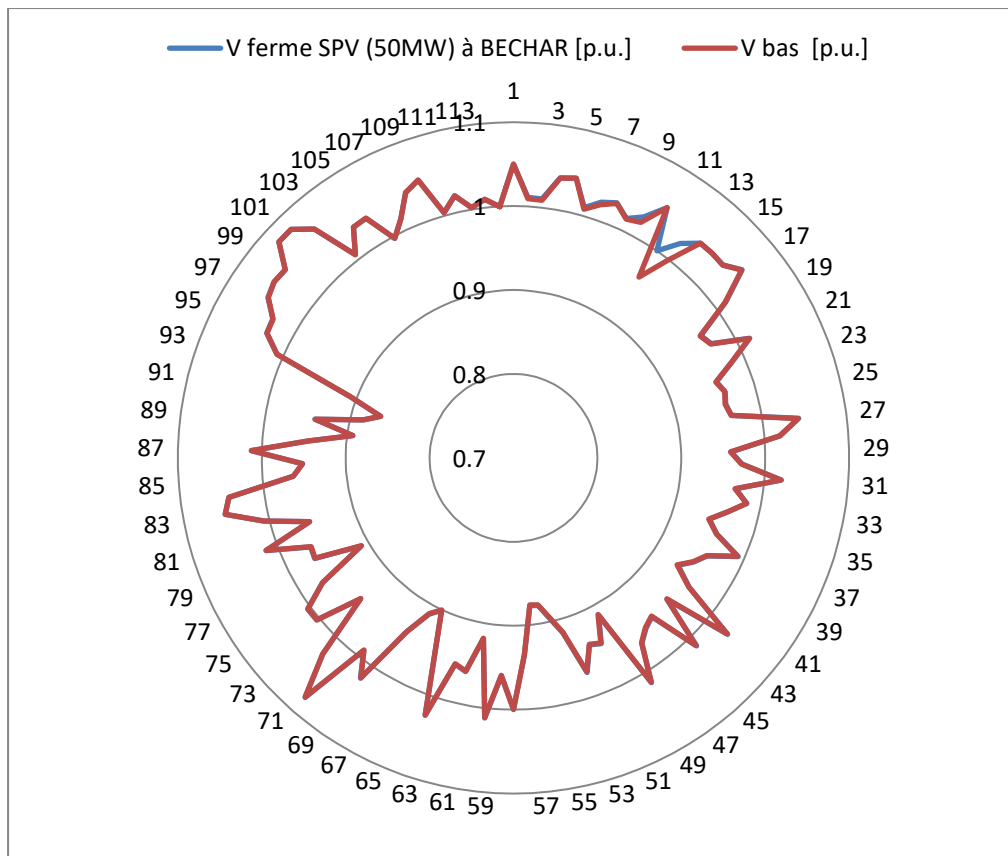


Figure III.10 : Profil de tensions du réseau Algérien en présence de la ferme SPV (50MW) à BECHAR (p.u)

D’après le tableau (III.5), on peut remarquer que l’insertion de la ferme SPV à BECHAR améliore le profil de tension des nœuds de charge N°7, N°10, N°12 et N°13.

Tableau III.5 : Amplitudes de tension avant et après l’insertion de la ferme SPV (50MW) à BECHAR.

Nœud N°	Nom du nœud	Cas de base (p.u)	GSPV à BECHAR (p.u)
7	SIDI BELABES	1.01800	1.02416
10	SAIDA	1.01900	1.03151
12	BECHAR	0.96227	1.04500
13	AIN-SEFRA	0.99760	1.04849

En ce qui concerne les allures des pertes actives et réactives du réseau Algérien, d’après la figure (III.11), nous remarquons que l’insertion de la ferme SPV diminue les pertes actives de la ligne N°66, ligne N°73, ligne N°103, ligne N°147.

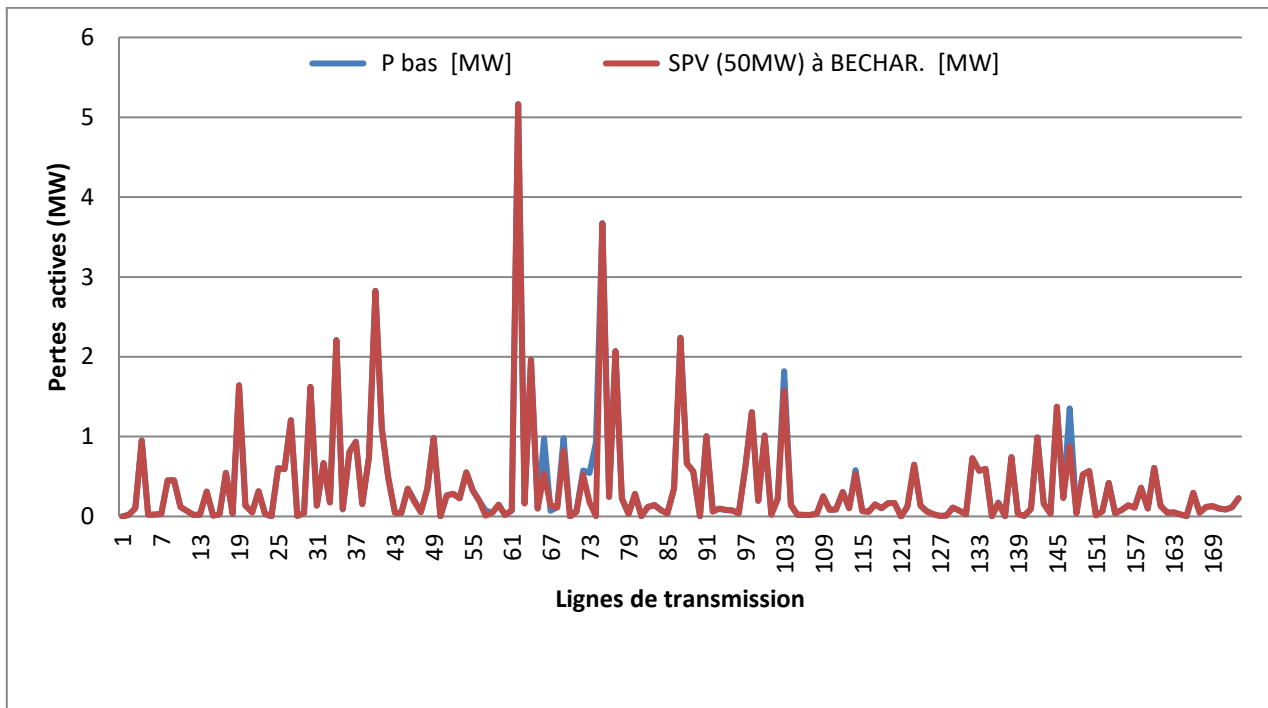


Figure III.11 : pertes actives avant et après l’insertion de la ferme PV (50 MW) à BECHAR.

D’après la figure (III.12), il est clair que l’insertion de la ferme SPV diminue les pertes réactives de la ligne N° 66, ligne N°73, ligne N°74, ligne N°147.

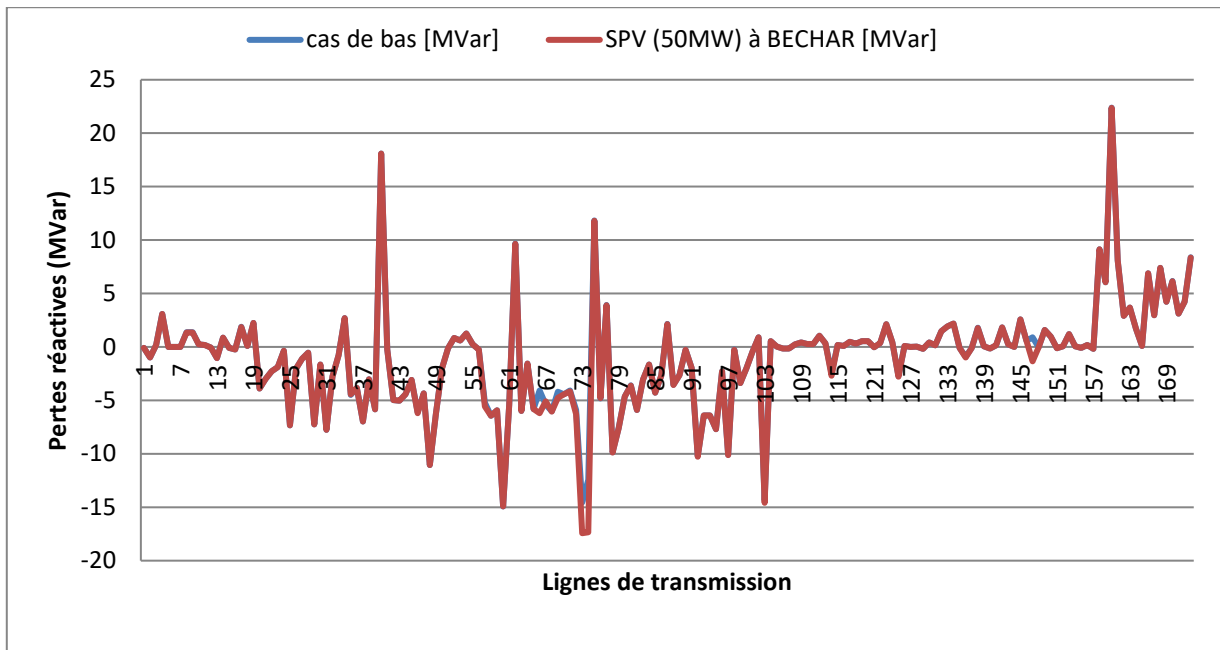


Figure III.12 : Perte réactive avant et après l’insertion de la ferme SPV (50MW) à BECHAR.

Pour mieux visualiser l’influence de l’énergie photovoltaïque sur la réduction des pertes transmission, tableau (III.6) illustre les valeurs de pertes actives et réactives dans la ligne avant et après l’insertion de la ferme SPV.

Tableau III.6 : Pertes de transmissions actives et réactives avant et après l’insertion de la ferme SPV (50MW) à BECHAR.

Du nœud	Au nœud	Ligne N°	Cas de base (MW)	GSPV à BECHAR (MW)
TIARET	Saida	66	0.9775	0.4781
ZAHANA	Tlemcen	69	0.9817	0.7950
BECHAR	AIN-SEFRA	73	0.544	0.1777
MERSAT EL HADJADJ 1	LOUD SLY 2	103	1.8199	1.5524
M MERSAT EL HADJADJ 1	SIDI BELABES	147	1.3542	0.8141
Du nœud	Au nœud	Ligne N°	Cas de base (MVar)	GSPV à BECHAR(MVar)
TIARET	SAIDA	66	-4.0697	-6,5288
BECHAR	AIN-SEFRA	73	-14.5669	-18.70080
SAIDA	AIN-SEFRA	74	-12.4281	-17.7066
MERSAT EL HADJADJ 1	SIDI BELABES	147	0.8963	-1.6743

III.6 Etude technico-économique de l'installation de la centrale photovoltaïque à Bechar

L'objectif de cette partie est de démontrer ou d'infirmer la rentabilité économique de l'énergie solaire photovoltaïque à BECHAR : Est-ce qu'un investisseur peut investir dans une telle solution en étant certain d'avoir un bon retour sur l'investissement ?

La méthode PVC est adoptée dans ce chapitre pour calculer le coût de kWh produit.

Cette méthode estime le développement dynamique des facteurs économiques pertinents et les différentes variables de coûts et de revenus, qui sont pris en compte indépendamment du fait que l'argent a été ou sera payé ou reçu dans le passé ou dans l'avenir, grâce à la déduction du coût accumulé en intérêt (actualisation) de l'ensemble des flux de paiement, à un temps de référence commun. La valeur actuelle des coûts (PVC : Present Value of Costs) est déterminée à l'aide de la relation :

$$PVC = 1 + C_{omr} \times \left[\frac{1+i}{r-i} \right] \times \left[1 - \left(\frac{1+i}{1+r} \right)^t \right] \quad (III.1)$$

- Le taux d'intérêt (r) et le taux d'inflation (i) sont, respectivement de 8% et 6%.
- La durée de vie (t) de l'installation.
- Les coûts C_{omr} annuels (O&M) : constituent une part importante des coûts totaux annuels d'exploitation. Cependant, pour l'éolienne il est admis qu'ils (C_{omr}) varient de 15 à 30 % du coût total d'investissement (coût de l'éolienne + autres coûts).

Pour le photovoltaïque (C_{omr}) varient de 1 à 5 % du coût total d'investissement. L'investissement est la somme du prix de l'installation et d'autres coûts initiaux, y compris ceux du génie civil, des infrastructures, de l'installation et de l'intégration au réseau.

Le coût de kWh produit (UCE : Unit Cost of Electricity) est ensuite déterminé par l'expression suivante :

$$UCE (\$/ kWh) = PVC / AEP \quad (III.2)$$

La production annuelle d'énergie cumulée (ou Annual Energy Production, AEP) est évaluée à l'aide de l'équation :

$$AEP = P_{e,moy} \times 8760 \quad (III.3)$$

Avec $P_{e,moy}$ est la puissance moyenne fournie par le générateur.

III.6.1 Coûts de production de la ferme photovoltaïque à BECHAR

Les coûts d'investissements dans les centrales au sol photovoltaïques ont été divisés par 6 entre 2007 et 2014. Cette baisse est principalement due à la baisse du coût de production des modules. Le potentiel d'innovation reste très important sur l'ensemble de la chaîne de valeur des projets. Avec le développement de la filière, les coûts devraient continuer à baisser d'environ 35% à l'horizon 2025 grâce, notamment, à l'amélioration des processus de production des équipements et l'augmentation des rendements des modules.

Dans la pratique, le facteur de capacité varie entre 9 et 20 % pour les installations solaires photovoltaïques pour la production d'électricité.

✓ Hypothèses pour la ferme photovoltaïque à BECHAR

- Puissance installée = 50 MW.
- Durée de vie (années)= 25.
- Temps de fonctionnement annuel à pleine puissance (h)= 1752.
- Production annuelle d'énergie (AEP)= 87600 MWh.
- Investissement (\$/kW)= 1272,82 -1572,38 (valeurs minimales et maximales en 2015).
- Exploitation fixe (\$/kW/an)= 63,64 - 78,61.

✓ Résultats obtenus :

- Coût de production (\$/kWh)= **0,01437** – **0,01775** (valeurs minimales et maximales).

✓ Discussion des résultats

Le coût du kilowattheure (kWh) produit par la centrale photovoltaïque installée sur le site étudié est évalué à l'aide des relations (1) et (2), compte tenu de la production annuelle estimée dans la région choisie. Ce calcul est effectué pour les valeurs maximales et minimales du coût d'investissement de la centrale.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure (III.13) qui illustre les valeurs (minimales et maximales) des coûts de l'électricité photovoltaïque. Selon la Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz (CREG), le prix du kilowattheure d'électricité d'origine classique vendu aux particuliers varie de **2,00 à 3,20 DA/kWh** soit **0,0175 à 0,02807 \$/kWh**.

Pour la réalisation de la centrale photovoltaïque à Béchar, les résultats montrent que les valeurs minimales et maximales (**0,01437 - 0,01775 \$/kWh**) du coût du kWh calculées ici restent inférieures à celle des tarifs actuels de vente.

Cet investissement est économiquement rentable pour les coûts d'investissement minimal et maximal (Voir figure (III.13)).

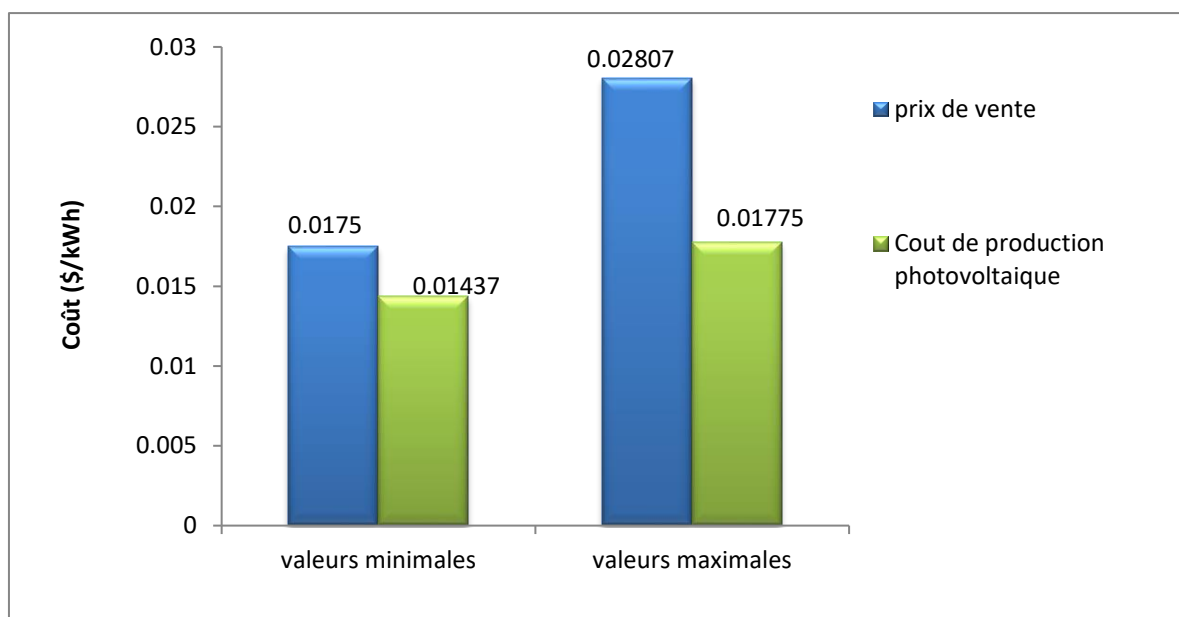


Figure III.13 : Estimation des coûts du kilowattheure de la centrale de production renouvelable pour le site étudié (BECHAR).

III.6.2 Apport positif de l'installation de la centrale photovoltaïque à Béchar

L'installation de la ferme solaire photovoltaïque à BECHAR améliore le profil de tension des nœuds de charge de SIDI BELABES, SAIDA, BECHAR et AIN-SEFRA.

Nous remarquons aussi que l'insertion de la ferme solaire photovoltaïque diminue considérablement les pertes dans les lignes N°66 (TIARET-SAIDA), ligne N°69 (ZAHANA-TLEMCEN), ligne N°73 (BECHAR-AINSAFRA), ligne N°74 (SIDA-AINSAFRA), ligne N°103 et ligne N°147 (MERSAT EL HADJADJ 1-SIDI BELABES). Les figures (III.14) et (III.15) présente l'apport positif de cette installation sur le réseau Algérien.

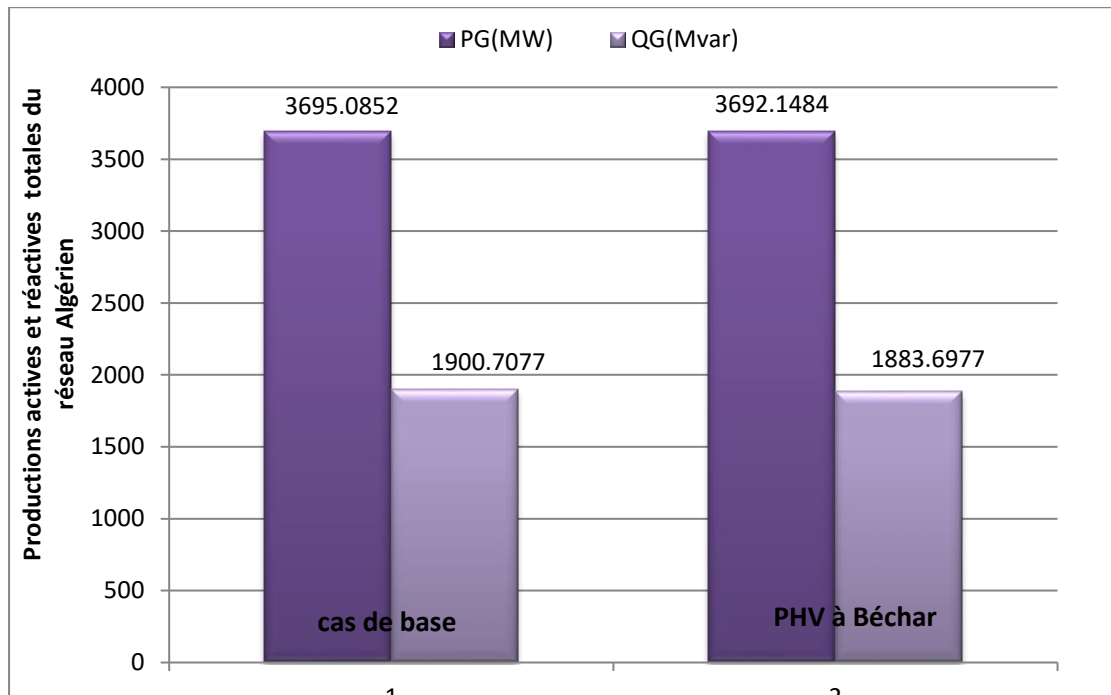


Figure III.14 : L'apport positif de cette installation sur le réseau Algérien (Productions thermique totales obtenues)

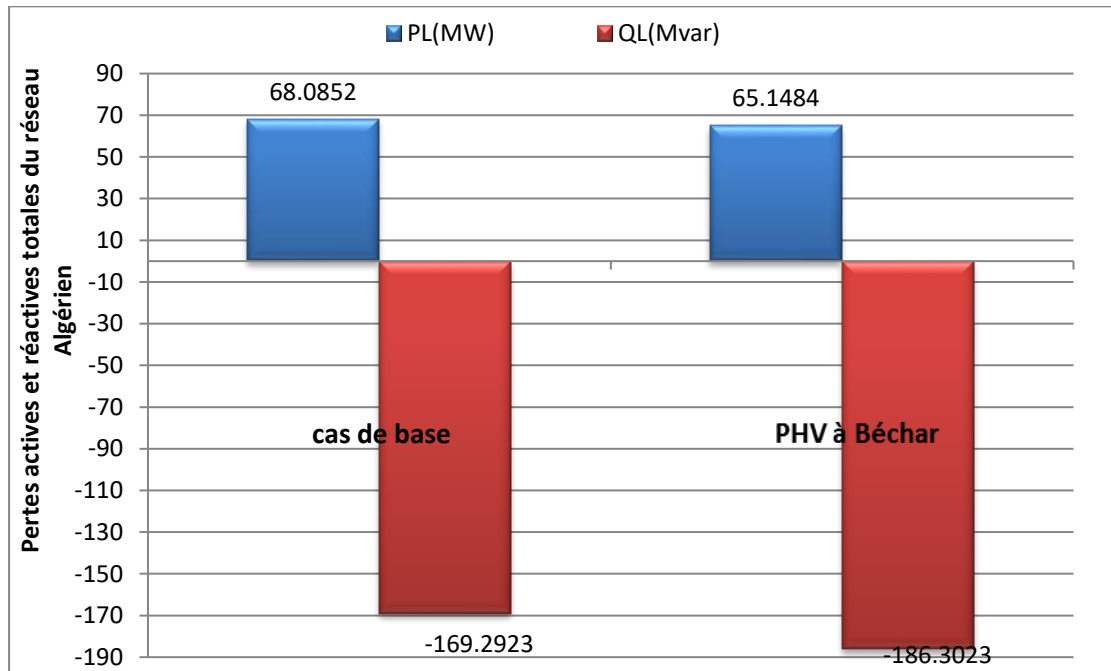


Figure III.15 : L'apport positif de cette installation sur le réseau Algérien (Pertes totales obtenues)

D'après les résultats de l'écoulement de puissance en présence de la centrale photovoltaïque, cette installation prouve son efficacité dans la minimisation de la chute de tension des nœuds proches de son emplacement.

Les résultats de simulation montrent également le rôle important du générateur solaire photovoltaïque dans la minimisation des pertes de puissance actives et réactives totales.

L'utilisation de cette méthode nous a permis de répondre à un certain nombre de questions, telles que :

- Quels sont les nœuds concernés par le problème de chute de tension ?
- Quelles sont les lignes concernées par le problème de pertes de transmission ?
- Quel est l'emplacement et la puissance optimale de la centrale photovoltaïque ?
- Quel est l'impact des énergies renouvelables sur l'écoulement de puissance du réseau ?
- Et finalement démontrer la rentabilité économique de l'énergie solaire photovoltaïque

III.6.3 Profit économique de l'installation de la centrale photovoltaïque à Béchar

Dans la deuxième partie de ce travail, une étude comparative sur le problème de l'OPF est présentée pour minimiser le coût de production total du réseau Algérien en présence de la centrale photovoltaïque, tout en considérant les contraintes d'égalité et d'inégalité. À partir des résultats de comparaison avec le cas conventionnel de base (coût de production totale de **2384283 ,6336 DA/h (pour 1 Dollar US (\$) (2025)=132 Dinar Algérien (DA))** et pertes de transmission totales de **62,729 MW**), nous constatons que le coût optimal de production et les pertes de transmission sont considérablement réduits après l'insertion de la ferme photovoltaïque à BECHAR.

Le bénéfice économique de l'insertion d'énergie photovoltaïque est plus élevé par rapport à l'insertion d'énergie éolienne, principalement parce que le coût d'opération et de maintenance (O&M) de la ferme photovoltaïque (qui représente **1% à 5 %** du coût de production complet) est plus faible que le coût d'O&M de la ferme d'éoliennes (qui représentent **30 %** du coût de production complet).

✓ Optimal power flow en présence de la ferme photovoltaïque

Dans cette partie, l'OPF est appliqué en tenant compte du coefficient de coût du générateur photovoltaïque ($d_{Si} = 2,51 \text{ \$/MWh}$).

La fonction objective à minimiser représente la somme du coût de production des générateurs thermiques et le coût de production de la centrale solaire photovoltaïque de 50 MW (modèle PV) connectée à BECHAR.

Le modèle de coût du combustible $F_i(P_{Gti})$ du générateur thermique peut être exprimé comme suit :

$$F_i(P_{Gti}) = a_i + b_i P_{Gti} + c_i P_{Gti}^2 \tag{III.4}$$

D'où P_{Gti} est la puissance active générée par le générateur thermique au nœud i , a_i , b_i et c_i sont les coefficients de coût du combustible.

✓ **Coût de fonctionnement du générateur photovoltaïque**

Le modèle de coût linéaire du générateur solaire photovoltaïque $F_i(P_{Gsi})$ peut être donné par :

$$F_i(P_{Gsi}) = d_{si} P_{Gsi} \tag{III.5}$$

D'où P_{Gsi} représente la puissance active du générateur photovoltaïque au nœud i et d_{si} représente le coefficient de coût direct du générateur photovoltaïque.

Les solutions optimales du réseau Algérien en présence du générateur solaire photovoltaïque sont présentées dans le tableau (III.7). La ferme solaire photovoltaïque connectée à BECHAR injecte 50 MW et -0,1772 MVar.

Tableau III.7 : Puissances actives optimales des générateurs en présence de GSPV

Variables	Min	Max	Cas de base	GSPV à BECHAR
P_{G1} (MW)	135	1350	431,518384	420,4897
P_{G5} (MW)	135	1350	430,881542	419,9663
P_{G11} (MW)	10	100	99,9999999	100
P_{G15} (MW)	30	300	181,688725	176,4868
P_{G17} (MW)	135	1350	434,55101	427,5047
P_{G19} (MW)	34,5	3450	188,580271	185,1002
P_{G22} (MW)	34,5	3450	186,066292	182,6755
P_{G52} (MW)	34,5	3450	183,983479	180,5389
P_{G80} (MW)	34,5	3450	185,450164	182,581
P_{G83} (MW)	30	300	183,499257	180,6276
P_{G98} (MW)	30	300	183,510189	180,4475
P_{G100} (MW)	60	600	599,999999	600
P_{G101} (MW)	20	200	200	200
P_{G109} (MW)	10	100	99,9999999	100
P_{G111} (MW)	10	100	99,9999998	100
P_{GS} BECHAR (MW)	0	50	-	50
Coût (DA/h)			2384283 ,6336	2339364,9444
Pertes (MW)			62,729	59,418

D'après les résultats obtenus, on remarque que les puissances actives optimales des générateurs thermiques sont diminuées considérablement avec l'insertion de la ferme photovoltaïque à BECHAR. Le coût de production totale du système Algérien est diminué de **2384283 ,6336 DA/h** à **2339364,9444 DA/h** après l'insertion du générateur photovoltaïque, ce qui implique que nous pouvons économiser (**44918,6892 DA/h**) par l'utilisation de cette énergie.

Les pertes actives totales sont diminuées de 62,729 MW à 59,418 MW (profit de 3,311 MW).

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude est présentée pour réduire le cout de production du réseau Algérien en présence d'énergie photovoltaïque, tout en considérant le cout de production des énergies renouvelables.

D'après les résultats obtenus, l'intégration du générateur photovoltaïque dans l'emplacement optimal peut participer efficacement à la réduction des pertes actives dans les lignes de transmission et spécialement les pertes causées par la grande longueur de la ligne de transmissions qui relie la région isolée avec le réseau national.

D'autre part, l'emplacement optimal de la ferme photovoltaïque à BECHAR peut éliminer la chute de tensions aux nœuds critiques et améliorer le profil de tensions aux différents nœuds de charge éloignés des centrales de production.

L'installation des générateurs photovoltaïque donne un profil économique très important par rapport au cas de base. Les résultats sont très satisfaisants ce qui encourage l'intégration des énergies renouvelables pour remplacer les combustibles fossiles et produire l'électricité d'une manière propre et plus durable.

Conclusion générale

Nos travaux se concentrent sur l'étude de l'insertion de l'énergie renouvelable, en particulier l'énergie photovoltaïque et son intégration au réseau électrique.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté le réseau électrique en général, en décrivant leur descriptions, classifications et fonction diverses.

Nous avons présenté les méthodes de l'écoulement de puissance pour améliorer efficacement la qualité d'énergie. Parmi ces méthodes, figurent la méthode de Newton –Raphson et la méthode de Gauss-Seidel, utilisées pour résoudre les problèmes de flux de puissance. L'écoulement de puissance optimale (OPF) est utilisé pour minimiser les coûts de production tout en satisfaisant diverses contraintes.

L'intégration de l'énergie renouvelable est considérée comme une solution d'avenir pour améliorer le contrôle et renforcer le système électrique.

Pour lutter contre le déséquilibre entre l'énergie produite et l'énergie consommée, et répondre à la demande croissante, de nouveaux systèmes de production non traditionnels sont utilisées, basées sur la source d'énergie renouvelables et connectées aux réseaux électriques à différents niveaux de tension en fonction du niveau d'énergie nominal.

Dans le deuxième chapitre, nous avons discuté les différents types d'énergies renouvelables, en donnant un aperçu de cette production renouvelables dans le monde et en Algérie. Ce chapitre présente également ses avantages dans les réseaux électriques surtout l'énergie photovoltaïque.

Le troisième chapitre présente une étude sur les méthodes de résolution de l'écoulement de puissance. Ce chapitre nous a permis de nous orienter vers l'utilisation du logiciel PSAT/MATLAB, qui est le plus adapté à la simulation et l'analyse des réseaux électrique intégrant des énergie renouvelables.

Ce chapitre présente aussi le réseau Algérien et les calculs de l'écoulement de puissance et de l'OPF, pour détecter les problèmes du réseau Algérien dans la pratique. Le calcul de l'écoulement de puissance nous a permis de trouver les nœuds les plus faibles du réseau électrique et les lignes qui causent une grande quantité de pertes, et le calcul de l'OPF nous a permis de minimiser le coût de production. Nous avons conclu qu'il est nécessaire de trouver des solutions basées sur les énergies renouvelables afin d'éliminer ces problèmes.

Ce chapitre est consacré à l'étude du réseau Algérien avec l'intégration de l'énergie renouvelable, plus particulièrement le générateur solaire photovoltaïque. Afin de traiter les problèmes du réseau, nous avons effectué des études dans plusieurs sites différents. Le choix de l'emplacement optimal de la ferme solaire

Conclusion générale

photovoltaïque est conditionné par les conditions climatiques du site et les résultats du calcul de l'écoulement de puissance. Selon les résultats obtenus du flux de puissance du réseau Algérien avec l'insertion de l'énergie photovoltaïque au site de BECHAR, on peut remarquer que cet emplacement donne un profit économique très satisfaisant.

La résolution des problèmes de l'écoulement de puissance et l'OPF nous a permis de conclure que l'utilisation de l'énergie renouvelable présente des avantages significatifs pour réduire le cout et les pertes de puissance et améliorer le profil de tension.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] A. Labiba, « Contribution à l'étude l'OPF du réseau Algérien basé sur les énergies renouvelables et les FACTS », Université de Djillali Laïbes Sidi Belabes, 2018.
- [2] D. Abdellah, « Répartition optimale des puissances utilisant les techniques de l'intelligence artificielle », 2016.
- [3] S. Mouassa, « Optimisation de l'écoulement de puissance par une méthode métaheuristique (technique des abeilles) », Université Ferhat Abbas Setif, Algérie, 2012.
- [4] D. R. S. W. Fardo, « Electrical distribution systems », Fairmont Press p. 471, 2008.
- [5] Google Scholar, « <https://theses.fr/1991ECDL0005> ».
- [6] L. Boufenneche, Université des Frères Montouri, 2017-2018.
- [7] A. Bouazza, *Réseaux électriques industriels – Cours et exercices résolus*. Université Ibn Khaldoun de Tiaret, Faculté des Sciences Appliquées, Département de Génie Électrique. Année universitaire 2020/2021
- [8] M. s. g. Saliha, « L'utilisation de l'algorithme d'optimisation essaim de particule pour résoudre le problème de dispatching économique basé sur l'énergie renouvelable en Algérie une étude de cas de bas de Naama », 2020.
- [9] B. E. Brown, « Electric power distribution reliability », Taylor Francis group, p. 18, 2009.
- [10] M. Saguan, « L'analyse économique des architectures de marché électrique application au market design du temps réel », Université Paris Sud, 2007.
- [11] L. Imen, « Dispatching Économique dans un système de puissance électrique par l'intelligence artificielle », 2013.
- [12] M. Garci, « Interaction des réseaux de transport et de distribution en présence de production décentralisée », l'institut polytechnique de Grenoble, 2008.
- [13] F. Hamoudi, « Généralité sur le réseau électrique ».
- [14] « Site électronique de Siemens global blackouts lessons learned », 28-30 juin 2005.
- [15] Dr. F. Hamoudi, « Chapitre I Généralités sur les réseaux », p. 10, 2018.

Références Bibliographiques

- [16] Boufenache , «chapitre1 reseau électrique », université des frères mantouri costantine 1 ,2017/2018
- [17] N. Mohamed, «*Installation électrique*».
- [18] A. o. a. m. i. a. v. h. t. F, «*Optimisation multi critère du placement d'un d-statcom dans un reseau de distribution par les colonies de fournis symposuim de genie électrique*, Arouna oloulade adolphe moukengue imano anotoine vianou herman tamadaho optimisation multi critère du placement d'un d-statcom dans un reseau de distribution », Nancy France, 2018.
- [19] ExoCo-LMD, «<https://www.exoco-lmd.com/>».
- [20] Connaissance des Énergies, «<https://www.connaissancedesenergies.org/>».
- [21] cli-cour, «<https://www.clicours.com/>» .
- [22] freepik, «<https://www.freepik.com/>».
- [23] Sofamel, « Fabricant de matériel électrique de sécurité,».
- [24] «Réseau de Transport d'Électricité (RTE), Les micro-réseaux : enjeux et perspectives pour le système électrique.,» 2021.
- [25] ADEME, «Le stockage de l'énergie : un enjeu clé pour la transition énergétique. Agence de la transition écologique»,2020.
- [26] SMA Solar Technology,« <https://www.sma.de/en/>».
- [27] Digi International, «<https://www.digi.com/solutions/by-technology>».
- [28] A. G. Phadke and J. S. Thorp, «Electric Power Systems: A Conceptual Introduction», 2008.
- [29] M. Aneke and M. Wang, «Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review»,2016.
- [30] A. G. P. a. J. S. Thorp, «Electric Power Systems: A Conceptual Introduction,» Wiley-IEEE Press», 2008.
- [31] *IEEE 09 bus system manitoba HVDC*, feseaech centre a division of marito ba hydro, 2014.
- [32] Zaouali. Sami Rouag Ousama siradj eddine, «des méthodes de l'écoulement de puissance», université Badji Mokhtar Annaba faculté des science de l'ingénieur , 2021.
- [33] A. J. W. B. F. & S. G. B. Wood, «*Power Generation, Operation*», 2013.

Références Bibliographiques

- [34] W. Amor, « *Écoulement de puissance pour les réseaux de grande dimension et fortement maillés* », École de technologie supérieure., 2016.
- [35] F. B. M. M. L. & L. K. E. adaoui, *adaoui, F., Ben Moussa*, « *Analyse de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution* », Université Kasdi Merbah Ouargla, 2021.
- [36] H.E.BROWN, *Solution of large networks by matrix methode*, New York p. 320,1975.
- [37] W. V. E. N. PETERSON, « *The interarea matrix : a tie line flow model for power pools* », IEEE transactions on power apparatus and systems,u vol. 90, pp. 36-45,1971.
- [38] o. e. b.scott, « *optimal load flow with steady state security* »,IEEE transaction on power systems,vol 93, pp. 745-751, 1971.
- [39] O.I.ELGERD, *electric energy systems theory ,teta mcgraw -hill*, p. 533,1983.
- [40] c.e.p. e. c. a. E.Acha, *FACTS Modiling and simulation in power networks*, jopon, , p. 420,2004.
- [41] J. S. M. e. R. C. Dugan, "*Power System Optimization*".
- [42] A. P. S. Meliopoulos, *Optimal Power Flow: Fundamentals, Methods, and Applications*".
- [43] J. S. M. e. R. C. Dugan, *Power System Optimization*.
- [44] M. jaouen, « *les energies renouvelables etat des leux et perspectives* », Italie , ettachée scientifique , 2005.
- [45] Futura Sciences, «<https://www.futura-sciences.com/>».
- [46] L.BOUFENNECHE, *reseaux electrique*, 2017/2018.
- [47] connaissance sur les energie renouvelable" www.france-renouvelables.fr/guide-energies-renouvelables/energies-renouvelables"
- [48] A.Meflah,«modélisation et commande d'une chine de pompage photovoltaïque», mémoire de magistère, telemcen, 2011.
- [49] «energie marine renouvelable en mediterraneé» .
- [50] HAL open science,«https://hal.science/search/index/?q=domain_t:spi».

Références Bibliographiques

- [51] C. Sarah, «Etude et dimensionnement technico-économique d'une centrale photovoltaïque».
- [52] B. Thononunies, *question de physique autour de l'énergie solaire*, pp. 8-23.
- [53] Planète Énergies, «<https://www.planete-energies.com/fr>»
- [54] J. -I. b. a. l. MICHEL, *énergie solaire photovoltaïque*, France, pp. 7,8,2009.
- [55] «ADEME (Agence de la transition écologique)»
- [56] «Guide pratique : "Le solaire photovoltaïque" – HESPUL / ADEME,»
- [57] s. f. e. a. d. c. photovoltaïque, France, p. 20,2005.
- [58] R. Jean, *photovoltaïque, recherches d'optimums d'énergie pour charge /décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications*, thèse doctorat de l'université de Toulouse, p. 52/53,2011.
- [59] GOOGLE, « <https://www.google.fr/imghp?ogbl>»
- [60] «isolé, une filière compétitive en site», avril 2018..
- [61] F-Z, Dr Boudjella, «*Système photovoltaïque*».
- [62] b. f. Zahra, *énergie photovoltaïque*.
- [63] c. Laughton, *eau chaude solaire*, France, pp. 9,241.2012.
- [64] Ministère d'énergie électrique,
«<https://www.energy.gov.dz/?rubrique=textes-legislatifs-et-reglementaires>» 2015.
- [65] C. Bernard, *station solaire autonome pour l'alimentation station pompage*, l'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, 2006.
- [66] P.R. Bonal, *les énergies alternatives*, omniscience, 2007.
- [67] ministère de l'énergie, «<https://www.energy.gov.dz/>».
- [68] M. Buresch, *photovoltaic energy systems*, Mc Graw –Hill USA . 1983.

Références Bibliographiques

- [69] GERGAUD O, '*Modélisation énergitue et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaqie couplé au réseau et un acumuler* ', l'école normale supérieure de cachan, 2002.
- [70] c. sarah, *Etude et dimensionnement technico économique d'une centrale photovoltaïque de 50 MW raccordée au réseau électrique a GUERRARA (GHARDAIA)*, 2021.
- [71] M. w. a. K. R.Fu . D . feldman R . Margolis, *u.s.solar photovotlaique system cost benchmark*, 2017.
- [72] Electricien De Confiance, «<https://izi-by-edf.fr/blog/trouver-electricien-confiance/>».
- [73] F.Milano, *An open source power system analysis toolbox. IEEE Transactions on Power Systems*, 2005.
- [74] H. & B. D. Guentri, *The impact of Naama's 12 MW solar project on the Algerian Southwestern electricity network*, 2020.
- A.salem, *different technique de planification de l'énergie réactive dans les reseaux électrique*, thèse de doctorat , école national de polytechnique d'Alger , 2008.
- [75]
- [76] M.Boucherit ,Y Sebaa . «Analyse et amélioration de la stabilité des réseau électrique sous l'environnement PSAT »,mémoire de master , université mohamed kheider de biskra facultié des sciences et de technologies département de génie électrique,2020.
- [77] M.Bouranane , D. Layachi , «Améliorattion de la stabilité transitiore d'un réseau électrique new england par systéms FACTS et application sur le reseau hassi berkine », master acadimique université kasdi merbah ourgla,2017.
- [78] E. M. DZ, *Le potentiel existant en Algérie peut lui permettre de se passer du gaz.*, <https://www.energymagazinedz.com>, 2022.