

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Faculté de Technologie
Département d'Electrotechnique



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

Master (LMD)

Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Intitulé :

**L'intérêt d'intégration d'un parc éolien à Adrar pour le
réseau Sud-Ouest Algérien**

Présenté par :

**MEHIDI FATNA AHLEM CHAHRA ZED
KAFI FATIMA ZOHRA**

Devant le jury composé de :

Dr. YAHIAOUI. Merzoug
Pr. LAKDJA. Fatiha
Pr. BOUMEDIENE. Labi

Président
Encadreur
Examineur

le 20 / 09 / 2020
Promotion 2019-2020

Résumé

Résumé

L'accès à l'énergie constitue une priorité stratégique dans le monde entier et avec la forte consommation de l'énergie qui est due principalement à la croissance démographique, le développement industrielle, transport,.....ect, les pays sont amenés à revoir leur politique énergétique tout en utilisant un mix-énergétique s'appuyant sur les énergies renouvelables.

L'exploitation des énergies renouvelables dans un pays comme l'Algérie est une nécessité absolue. C'est pour cela que l'Algérie, amorce un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique, le développement de cette énergie propre l'un des résultats importants de cette politique est l'intention du gouvernement de construire un parc éolien dans le désert du sud-ouest de l'Algérie.

Notre travail se focalise sur l'intérêt de cet investissement pour la région sud-ouest de l'Algérie sise à kebrtene (wilaya d'Adrar) dans le but d'améliorer la qualité de l'énergie dans cette région sans perturber le réseau. Nous utilisons un logiciel comme outil de simulation.

Mots clés : *Energie renouvelable, efficacité énergétique, parc éolien, sud-ouest Algérien.*

Abstract

The access to energy is a strategic priority worldwide and with the high consumption of energy which is mainly due to population growth, industrial development, transport,... ..ect, countries are led to review their energy policy while using an energy mix based on renewable energies.

The use of renewable energies in a country like Algeria is an absolute necessity. This is why Algeria, initiates an ambitious program of development of renewable energies and energy efficiency, the development of this clean energy one of the important results of this policy is the intention of the government to build a park wind turbine in the desert of southwest Algeria.

Our work focuses on the interest of this investment for the southwest region of Algeria located in kebrtene (wilaya of Adrar) with the aim of improving the quality of energy in this region without disturbing the network. We use software as a simulation tool.

Key words: *Renewable Energy, energy efficiency,park wind, southwest Algeria*

Remerciements

Remerciements

Louange à dieu le Tout-puissant de nous avoir donné foi, courage, volonté et patience de mener à terme cette thèse de mémoire de fin de cycle Master II

*Nous souhaitons d'abord et avant tout remercier particulièrement notre directrice de mémoire, Madame **FATIHA LAKDJA**, professeur à l'université de Saida à qui nous lui exprimons notre profonde reconnaissance et ample gratitude pour la confiance qu'elle nous a faite durant toutes ces années d'études pour ses qualités humaines, pour sa patience, sa disponibilité en ce temps de covid 19 et surtout ses judicieux conseils en cette difficile conjoncture par l'apport de tous les outils pédagogiques et méthodologiques indispensables qui ont contribué à nous guider sous sa conduite à la réalisation de ce projet.*

*Nous adressons nos remerciements les plus sincères à Monsieur **YAHIAOUI MERZOUG**, Docteur à l'université de Saida, pour avoir accepté de présider le jury*

*Nous voudrions remercier vivement les membres du jury: Monsieur **BOUMEDIENE LARBI**, Professeur à l'université de Saida, pour l'honneur qu'il nous a fait par sa participation à l'évaluation scientifique de ce travail en tant qu'examineur.*

Nous tenons à exprimer nos remerciements et notre gratitude à tous nos enseignants pour l'enseignement de qualité dispensé durant ces cycles d'études.

*Nous remercions vivement Monsieur **DJAAFRI** chef de centre de la ferme éolienne Kabertene (Adrar) et C. Hamel chef de centre photovoltaïque de Ain Skhouna (Saida) ; pour nous avoir donné en ce temps de COVID 19 l'occasion extraordinaire de réaliser notre travail de terrain par l'accès au centre de Ain Skhouna, par leurs abondantes informations, et à tous les intervenants et toutes les personnes qui par leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant nos recherches.*

A nos parents nous leur disons pour leur soutien physique, moral sans faille, pour leurs encouragements et pour tous les sacrifices consentis : M E R C I

DEDICACE

Que ce mémoire de fin d'année traduise par la grâce de Dieu toute mon affection et ma gratitude à mes parents pour leur indéfectible soutien , pour leurs encouragements , leurs conseils et surtout pour le sacrifice qu'ils ont consentis et que rien ne peut compenser , aussi je leur dédie ce travail avec une grande joie.

Je le dédie aussi à mes très chers frères sans oublier mes oncles , mes tantes, cousins et cousines et mes adorables neveux Ayan et wassim et leur mère enfin à toute ma grande famille .

A toutes mes amies et collègues du cursus universitaire et surtout aux enseignants qui nous ont motivé et assisté durant toute notre formation universitaire.

A mon binome Fatima

Mehidi Ahlem

DEDICACE

Que ce mémoire de fin d'année traduise par la grâce de Dieu toute mon affection et ma gratitude à mes parents pour leur indéfectible soutien , pour leurs encouragements, aussi je leur dédie ce travail avec une grande joie.

Je le dédie aussi à mes très chers sœur : Asma et hadejr sans oublier mon frère , mes tantes, cousins et cousines à toute ma grande famille . A toutes mes amies : fatna ,houda , kheira et collègues du cursus universitaire et surtout aux enseignants qui nous ont motivé et assisté durant toute notre formation universitaire.

A mon binome Ahlem

Kafi Fatima

Table de matière

- ❖ Liste des symboles et abréviation
- ❖ Liste des figures
- ❖ Liste des tableaux

Introduction générale en anglais.....	1
Introduction générale	5

Chapitre 1 : Evolution des énergies renouvelables dans le monde

I.1 Introduction.....	10
I.2 Définition des énergies renouvelables	10
I.3 Les principales sources d'énergies renouvelables:	11
I.4 Les différents types d'énergies renouvelables :	12
I.4.1 L'énergie solaire.....	12
I.4.1.1 Energie solaire photovoltaïque	12
I.4.1.2 L'énergie solaire thermique.....	13
I.4.2 L'énergie éolienne.....	13
I.4.3 L'énergie de la biomasse.....	14
I.4.4 L'énergie hydraulique	15
I.4.5 L'énergie géothermique	15
I.5 Evolution des énergies renouvelables dans le monde.....	16
I.5.1 Evolution de l'énergie Photovoltaïque dans le monde.....	18
I.5.2 Evolution de l'énergie Solaire thermique	25
I.5.3 Evolution de l'énergie éolienne	28
I.5.4 Evolution d'énergie hydroélectricité dans le monde.....	34
I.5.6 Evolution de l'énergie de la biomasse	39
I.6 Le renouvelable minoritaire dans les autres secteurs énergivores	41

I.7 Conclusion	42
----------------------	----

Chapitre 2 : les énergies renouvelables en Algérie

II.1 Introduction	45
II.2 Généralités sur la situation énergétique en Algérie.....	46
II.3 Les énergies renouvelables comme solution.....	48
II.4 Programme national et efficacité énergétique.....	49
II.5 Programme national de développement des énergies renouvelables	51
II.6 Perspectives des énergies renouvelables en Algérie	52
II.7 Potentiel des énergies renouvelables en Algérie	53
II.7.1 L'énergie solaire photovoltaïque	54
II.7.2 L'énergie solaire thermique.....	63
II.7.3 L'énergie géothermique.....	64
II.7.4 L'énergie biomasse.....	67
II.7.5 L'énergie hydraulique.....	68
II.7.6 L'énergie éolienne	68
II .8 Conclusion.....	73

Chapitre 3 : Ecoulement de Puissance

III.1 Introduction.....	75
III.2 Historique des systèmes électriques	76
III.3 Ecoulement de puissance	77
III.3.1 Philosophie de l'écoulement de puissance	77
III.3.2 Concept général de l'écoulement de puissance.....	77
III.3.3 But de l'étude de l'écoulement de puissance	77
III.4 Formulation pour l'écoulement de puissance	78
III.4.1 Classification des jeux de barres	78
III.5 Évolution des méthodes de l'écoulement de puissance.....	79
III.5.1 Méthodes de l'écoulement de puissance (PF).....	79
III.5.2 Analyse de l'écoulement de puissance.....	80
III.5.3 Algorithme de résolution du problème de l'écoulement de puissance	80

III.5.4 Matrice d'admittance	81
III.5.3.1 Les équations de l'écoulement de puissance	82
III.6 Résolution d'un problème d'écoulement de puissance	83
III.6.1 Méthode de Gauss Seidel	83
III.6.2 Méthode de Newton-Raphson.....	84
III.6.3 Méthode de Découplée Rapide	85
III.7 Méthodes de l'écoulement de puissance dans PSAT	86
III.8 PSAT (Boîte à outils d'analyse du système d'alimentation):	88
III.9 Utilisateurs	91
III.9.1 Lancement du PSAT :	91
III.9.2 Chargement des données :.....	92
III.9.3 Exécution du programme :.....	92
III.9.4 Affichage des résultats :.....	93
III.9.5 Enregistrement des résultats :	93
III.9.6 Réglages	93
III.10 Conclusion	95

Chapitre 4 : Simulation et Réalisations

IV.1 Introduction.....	97
IV.2 Evolution de la consommation d'électricité en Algérie.....	97
IV.3 Evolution du réseau électrique Algérien.....	98
IV.3.1 Transport d'électricité	98
IV.3.2 Le Réseau Interconnecté du Nord « RIN »	98
IV.3.3 Le pôle d'IN- SALAH, ADRAR et TIMIMOUN « PIAT ».....	100
IV.3.4 Les Réseaux Isolés du Sud « RIS ».....	100
IV.4 Identification du réseau isolé d'ADRAR (PIAT)	100
IV.5 La problématique	101
IV.6 La première solution proposée.....	101
IV.7 La simulation du réseau PIAT réel sur PSAT.....	101
IV.7.1 Les résultats de simulation	102
IV.7.2 Analyse et discussion	105
IV.7.3 Comment affronter ces différents problèmes	106

IV.8 Intégration des centrales Photovoltaïques et le parc éolien sur le réseau réel PIAT	106
IV.8.1 Insertion d'un parc éolien sur le réseau réel PIAT	111
IV.9 Réalisation du réseau réel RIN (Saida – Naama –Bechar)	115
IV.9.1 Intégration des centrales photovoltaïques dans le réseau réel RIN	118
IV .10 Réalisation du réseau réel RIN (Saida – Naama –Bechar) et le réseau réel PIAT dans le PSAT	122
IV.11 Deuxième solution proposée.....	125
IV.12 Réalisation de la maquette représentative.....	130
IV.12.1 Consistance électrique du réseau PIAT.....	130
IV.13 Conclusion	136
Conclusion générale.....	138
Références bibliographies.....	141
Annexes.....	149

*Liste des
Abréviations et
Symboles*

Abréviations	
EnR	Energie Renouvelable
GPV	Générateur Photovoltaïque
PPM	Point de Puissance Maximale
PV	Energie solaire Photovoltaïque
AIE	Agence Internationale de l'Energie
GWEC	Global Wind Energy Council
UE	Union Européenne
EGS	Enhanced Geothermal System
GDC	Geothermal Development Company
FIE	Fournisseurs Indépendants d'Energie
OPEP	Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole
APS	Algérie Presse Service
PDG	Président Directeur Général
CIC	Centre International des Conférences
ENI	Ente Nazionale Idrocarburi (National Hydrocarbons Authority)
CREG	commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz
SKTM	Shariket el kahraba wa et Taket el Moutadjadida
GRTE	Réseau de Transport de l'Electricité
FNME	Fond National de la Maîtrise de l'Energie
CDER	Centre de Développement des Energies Renouvelables
ONM	Office National de la Météorologie
STE	Système de Transmission Electrique
CC	courant continue

FACTS	Flexible Alternative Current Transmission Systems
AC	Courant Alternative
EP	Ecoulement de Puissance
JPV	Jeux de barres de contrôle
JPQ	Jeux de barres de charge
FDLF	Fast-Decoupled Load-Flow
NR	méthode Newton-Raphson
PSAT	power système Analyze Toolbox
GNU octave	un logiciel libre de calcul numérique comparable à Matlab
IPI	Interested Parties Information (Interface utilisateur graphique)
PMU	Placement de l'Unité de Mesure de phasor
GUI	Graphical User Interface
GAMS	General Algebraic Modeling System
MATLAB	Matrix Laboratory
PIAT	pôle d'In- salah, Adrar et Timimoun
RIN	Réseau Interconnecté du Nord
RIS	Réseaux Isolés du Sud

Symboles	
Y_{Bus}	Matrice admittance nodale
V_{Bus}	Vecteur des tensions complexes des jeux de barres
I_{Bus}	Vecteur des courants complexes injectés aux jeux de barres
Y_{im}	Élément de im la matrice admittance
I_i	Courant net injecté à un jeu de barres
V_m	Tension d'un jeu de barres m
V_m et δ_m	Module et phase de la tension au jeu de barres m
Y_{im} et θ_{im}	Module et argument de l'élément im de la matrice admittance
S_i	Puissance apparente injectée à un jeu de barres i
P_i et Q_i	Puissances active et réactive injectées au jeu de barres i
V_m et δ_m	Accroissements du module et phase de tension au JB m
$J_1, J_2, J_3, J_4,$	Sous matrices du Jacobienne
P_c	La puissance réactive dans une ligne de transmission
Q_c	La puissance réactive dans une ligne de transmission

Liste des figures

Figure	Titre	Page
I-1	Schéma des principales sources d'énergies renouvelables	11
I-2	Système PV raccordé au réseau	12
I-3	Système photovoltaïques avec stockage	13
I-4	Conversion de l'énergie cinétique du vent	14
I-5	Photos d'un parc éolien	14
I-6	L'énergie biomasse	15
I-7	L'énergie Hydraulique	15
I-8	L'énergie géothermie	16
I-9	Les énergies renouvelables dans le monde	18
I-10	Evolution de l'énergie photovoltaïque dans le monde en 2016	19
I-11	La capacité totale de production d'énergie solaire en Afrique, de 2008 à 2018	20
I-12	Le plus grand parc photovoltaïque d'Europe qui s'étendra sur 1.981 hectares verra le jour en 2022-2023 dans le Lot-et-Garonne et sera financé à 100% par cinq opérateurs du secteur des énergies renouvelables	23
I-13	Le projet vert de <u>éco-cité</u> , qui ouvrira en 2020 dans la chine	24
I-14	Le plus grand parc solaire flottant du monde	25
I-15	La plus grande centrale solaire asiatique a concentration 2018	26
I-16	Le complexe de Noor, près de Ouarzazate, Maroc	26
I-17	La plus grande centrale solaire dans le monde en 2030, Dubaï	27
I-18	Part des renouvelables dans la production mondiale d'électricité en 2016	28
I-19	Le parc éolien de Teesside dans le Nord-Est de l'Angleterre	29
I-20	Puissance de l'éolien raccordée par région en 2017	30
I-21	Le parc éolien offshore en Turquie	31

I-22	Production d'électricité éolienne des cinq pays leaders	32
I-23	Parc éolienne offshore en Allemande 2018	32
I-24	Parc éolienne offshore dans la Chine	33
I-25	La plus grande éolienne offshore au Royaume-Uni	34
I-26	Projet de grand parc éolien d'Afrique-Kenya	35
I-27	La production mondiale d'hydroélectricité	36
I-28	La centrale hydroélectrique de Wudongde en chine 2020	37
I-29	Les centrales géothermiques en Europe	39
I-30	Puissance installée de la géothermique	39
I-31	Production mondiale de biocarburants	41
I-32	Répartition de la bioénergie en France 2017	42
II-1	Objectifs du programme Algérien des énergies renouvelables 22GW à l'horizon 2030	51
II-2	Les perspectives du programme national des énergies renouvelables Algérien 2015-2030	53
II-3	L'Algérie dispose d'un des potentiels Solaire et éolien les plus élevés en Afrique du Nord	54
II-4	Potentiel solaire Algérienne dans le monde en 2015	54
II-5	Production d'électricité par filières	56
II-6	Potentiel solaire en Algérie	56
II-7	Les centrales solaires photovoltaïques et éolienne en Algérie	57
II-8	Sonatrach acquiert sa première centrale photovoltaïque dans Ouargla 2018	58
II-9	Projet de 350MW d'énergie solaire de L'Italien ENI en Algérie	59
II-10	projet de 150 MW en énergie solaire à travers les wilayas (Biskra- El oued-Ouergla- Ghardaia) 2015	60

II-11	Centrale solaire photovoltaïque de Kabertène (03MWc) 2015	60
II-12	Centrale solaire photovoltaïque d'Adrar (20MWc) 2015	60
II-13	Centrale solaire photovoltaïque de Timimoun (09MWc) 2016	61
II-14	Centrale solaire photovoltaïque de Saida-Ain Skhouna (30 MWc) 2016	62
II-15	L'énergie solaire thermique	63
II-16	Banc d'essais des capteurs solaires plans et chauffe-eau solaire réalisé par la division solaire thermique et géothermie	63
II-17	Localisation et température des ressources géothermiques en l'Algérie	66
II-18	Atlas de la puissance énergétique récupérable à 50m	68
II-19	Potentiel éolienne	69
II-20	Différence au niveau de la vitesse des vents en l'Algérie	70
II-21	Implantation de la ferme éolienne de Kabertene	71
II-22	Plan d'implantation de la ferme éolienne de Kabertene	71
II-23	La ferme éolienne 2015	72
II-24	Le parc eolien de keberten (wilaya d'Adrar) en 2014	72
II-25	La ferme éolienne de Kabertène (wilaya d'Adrar) un modèle réussi d'exploitation des énergies propres et renouvelables en 2016	73
III-1	Algorithme de résolution du problème de la répartition des charges	80
III-2	Réseaux à 3 nœuds	81
III-3	Organigramme de la méthode de Newton Raphson	87
III-4	PSAT en un coup d'œil	90
III-5	PSAT dans le monde entier en 2010	91
III-6	(a) Interface de PSAT, (b) Bibliothèque Simulink de PSAT	93
III-7	Interface pour les paramètres de l'écoulement de puissance	94
IV-1	Les interconnexions internationales existantes sur le RIN	98

IV-2	Le schéma du réseau SPTE du RIN	99
IV-3	Topologie du réseau Algérien (Saida-Naama-Bechar)	99
IV-4	Topologie du réseau Algérien (Adrar-Timimoun-Ain salah)	100
IV-5	Schéma du réseau électrique PIAT dans le PSAT	101
IV-6	Profils d'amplitudes de tensions en (pu) en fonction des nœuds du réseau PIAT	102
IV-7	Flux de puissance active en (pu) dans les lignes du réseau PIAT	103
IV-8	Flux de puissance réactive en (pu) dans les lignes du réseau PIAT	104
IV-9	Les pertes actives en (pu) dans les lignes de transmission du réseau PIAT	104
IV-10	Les pertes réactives en (pu) dans les lignes de transmission du réseau PIAT	104
IV-11	Schéma du réseau PIAT modifiés réalisé dans le PSAT avec les centrales PV et le parc éolien	106
IV-12	La variation de la tension en (pu) avant et après l'insertion du parc éolien et PV	107
IV-13	La variation des pertes actives en (pu) avant et après l'insertion du parc éolien et PV	108
IV-14	La variation des pertes réactives en (pu) avant et après l'insertion du parc éolien et PV	109
IV-15	Les pertes total en (pu) avant et après l'incorporation des sources renouvelables	110
IV-16	Schéma du réseau PIAT modifiés réalisé dans le PSAT avec intégration du le parc éolien dans Kebrtene	111
IV-17	La variation de la tension en (pu) avant et après l'insertion du parc éolien	112
IV-18	La variation des pertes réactives en (pu) après l'insertion du parc éolien	113
IV-19	La variation des pertes réactives en (pu) avant et après l'insertion du parc éolien	114
IV-20	Schéma du réseau électrique RIN dans le PSAT	115
IV-21	Schéma du réseau électrique après l'intégration des centrales PV dans les wilayas de Saida et Naama	118

IV-22	La variation de la tension nodales en (pu) avant et après l'insertion du PV	119
IV-23	La variation des pertes actives en (pu) avant et après l'insertion du PV	121
IV-24	La variation des pertes réactives en (pu) avant et après l'insertion du PV	121
IV-25	Schéma du réseau électrique RIN et le réseau PIAT dans le PSAT	122
IV-26	Schéma du réseau électrique après l'intégration PV et le parc éolien dans le PSAT plus la liaison électrique entre les wilayas Bechar-Timimoun	126
IV.27	La maquette representative	131
IV.28	Le réseau PIAT avant l'alimentation	132
IV.29	Le réseau interconnecté PIAT avant l'alimentation	132
IV.30	Les deux régions In-Salah et Timimoune avant l'alimentation	133
IV.31	La région Adrar avant l'alimentation	133
IV.32	La maquette représente le réseau PIAT	133
IV.33	La région In Salah avant l'alimentation	134
IV.34	La région Timimoune avant l'alimentation	134
IV.35	La région Timimoune après l'alimentation	134
IV.36	La région Adrar après l'alimentation	135
IV.37	La maquette représente le réseau PIAT après l'alimentation	135
IV.38	La région In Salah après l'alimentation	136
A-1	Schéma d'un aérogénérateur	151
A-2	Transformateur Elévateur de Kiosque	152

*Liste des
tableaux*

Tableau	Titre	Page
I-1	Production d'électricité solaire photovoltaïque dans le monde TWh	20
I-2	Principaux pays producteurs d'électricité d'origine hydraulique en 2016	35
II-1	Evolution des paramètres énergétiques (2015-2017)	55
III.1	Les variables au niveau des différents types de jeu de barres	79
IV.1	Résultats des tensions nodales en (pu) du réseau PIAT avant l'incorporation des sources renouvelables	102
IV.2	Résultats de puissances transmises active, réactive et les pertes du réseau en (pu) PIAT avant l'incorporation des sources renouvelables	103
IV.3	La production, la charge et les pertes totales du réseau PIAT	105
IV-4	Les tensions nodales en (pu) sans et avec les centrales PV et le parc éolien	107
IV-5	Les pertes actives et réactives en (pu) avec et sans PV et parc éolien	108
IV-6	Les pertes totales en (pu) du réseau avec et sans PV et le parc éolien	109
IV-7	Les tensions nodales en (pu) du réseau PIAT avec et sans le parc éolien	111
IV-8	les puissances générées en (pu) avec et sans parc éolien	112
IV-9	les pertes active et réactive des lignes en (pu) avec et sans le parc éolien	113
IV.10	Les pertes totales active et réactive en (pu) avec et sans le parc éolien	114
IV-11	Tensions et puissances obtenu en (pu) avant l'insertion des centrales PV	116
IV-12	La production, la charge et les pertes en (pu) totales du réseau RIN	116
IV-13	Les puissances transitées en (pu) dans le réseau RIN	117
IV-14	Les tensions nodales en (pu) du réseau électrique RIN avec et sans PV	119

IV-15	Les pertes totales en (pu) du réseau RIN	120
IV-16	Les puissances générées en (pu) avec et sans PV	120
IV-17	Les puissances transitées et les pertes en (pu) dans le réseau électrique RIN	120
IV-18	La production, la charge et les pertes totales du réseau interconnecté (PIAT-RIN)	122
IV-19	Tensions obtenu en (pu) réseau entre (PIAT et RIN)	123
IV-20	Les puissances transitées en (pu) dans le réseau électrique interconnecté (RIN-PIAT)	124
IV-21	Les puissances transitées en (pu) dans le réseau électrique interconnecté (RIN-PIAT)	127
IV-22	La production, la charge et les pertes totales du réseau interconnecté (PIAT-RIN)	128
IV.23	Les tensions obtenu en (pu) avant et après la liaison électrique et l'intégration du PV et le parc éolien de notre réseau entre (PIAT et RIN)	128
IV-24	les pertes active et réactive en (pu) avant et après la liaison électrique , et l'insertion du PV et le parc éolien dans le réseau électrique RIN et PIAT	129
IV-25	Les puissances générées en (pu) avec et sans PV	130
A-1	caractéristique d'aérogénérateur centrale Kabertene	151
A-2	Plaque Signalétique de Transformateur	151

General
Introduction

General Introduction

Due to the significant changes that have taken place over the past decades, the global energy context is currently experiencing major changes, calling for a redefinition of needs and consumption patterns, because the risk of depletion of non-renewable resources such as that the widely exploited petroleum, natural gas and coal are on the way out. Lack of new discoveries. Global warming and nuclear disasters make it clear that the current energy model is not sustainable. It is therefore necessary to initiate a transition towards a model that would be more sustainable for the needs of present and future generations. [1]

Energy has become a fundamental element in all areas because of our different requirements in several domestic industrial terms and other innovations. Faced with the depletion of natural resources, the scarcity of oil, the dangers of fossil fuels at constant costs, their danger in terms of environmental degradation, faced with the challenge of urgently reducing greenhouse gas emissions (GHG) which have led to devastating environmental disasters on all continents where developing countries have been the most vulnerable and faced with the ever-increasing global energy demand, the world has been forced to become aware to think more and more. no longer to change the way it is produced and consumed energy for an ecological purpose, which is why the idea of ecological transition is developing throughout the world through new techniques of renewable energy production. Since the dawn of humanity, energy production has been based largely on fuels such as wood, fossils (coal, oil, gas ...), then uranium. But the big problem accompanying the use of these materials is the emission of gases and the massive releases of various compounds; what unbalances our planet by the direct emission of several million tons of CO₂ causing high degrees of pollution and temperature; as well as the reduction of nature reserves. So we need to look for other alternatives to fossil fuels to produce electricity with non-polluting renewable sources and more economical by making good use of the elements of nature such as water, sun and wind. [2]

Algeria's current and future challenges, such as strong population growth, rapid urbanization, accelerated development and rising energy demand, could intensify knowing that the Algerian population grows by 1.5 at 3% per year so that we are doubling our population every 40 years. Energy consumption at the national level is increasing year after year due to demographic and urban development, in addition to the ever increasing economic development.

Algeria's energy needs are covered by hydrocarbons, mainly natural gas. Other forms of energy are mobilized only when natural gas cannot be used. Electricity consumption is

expected to reach 75 to 80 TWh in 2020 and 130 to 150 TWh in 2030, in the long term, the extension of the national energy consumption model may affect the existing balance between supply and demand for this source of energy. The imbalance between production and consumption leads to major blackouts in the electricity network such as load shedding, blackout and consequently enormous economic losses. In order to meet this new demand, existing electrical networks must be strengthened to ensure the necessary quality of power. [3]

The use of renewable energies is imperative for a country like Algeria which has a favorable climate for the development and expansion of the renewable energy sector, especially in the production of electricity. Algeria has a very important energy potential, which is why Algeria is initiating a green energy dynamic. [4]

It is in this objective that our study is inserted which relates to one of the renewable energies in development at this time which is the wind energy .., [4] this study is interested in the 1st wind farm of " Algeria in the Adrar (Kabertene) area which is the heart of Sonelgaz's 1st experience in Algeria and particularly in the field of electricity production on the network connected by wind energy and these wind turbines are equipped with systems control and safety in order to ensure correct operation under the various conditions.[2]

Our work focuses on the benefit of integrating a wind farm into the South-West network of Algeria

It is therefore within this framework that we will develop our study through the following chapters:

- ❖ **In the first chapter** we will present and define renewable energies; their main sources, the different types of energy and their evolution in the world.
- ❖ **In the second chapter** we will discuss generalities on the energy situation; greenhouse gas emissions (GHG), the coronavirus pandemic 19 and its repercussions on the Algerian economy and the economic crisis in Algeria and why Algeria must focus its strategy on sustainable and inexhaustible resources such as solar (whose deposit is one of the highest in the world) or wind power (whose potential is characterized by higher speeds in the south 5m / s to 7m / s and north between 4m / s to 6m / s). Renewable energies as a solution, the national program and energy efficiency, the national program for the development of renewable energies and their

perspective we will also talk about the potential of renewable energies in Algeria and the existing wind farms.

- ❖ **The third chapter** will be devoted to the flow of power; the history of electrical systems, the purpose of power flow, and methods of resolving power flow. We will explain why the PSAT / MATLAB software is used for the analysis of electrical networks in our work and how this software is best suited to our problem.
- ❖ **The fourth chapter** is devoted to the realization of the real network PIAT (Ine Salah-Adrar-Timimoune) is a part of the RIN network (Interconnected network of the North) simulated on PSAT and to the comparison between the current real network and the different variants of simulation for the improvement of this network (With and without injection of a wind farm and PV), that we have shown on a reduced scale on a model.

Finally, we will end this thesis with a general conclusion that sums up our study.

Introduction
Générale

Introduction Générale

Du fait des changements importants qui se sont produits durant des dernières décennies, le contexte énergétique mondial connaît aujourd'hui de grandes mutations, il appelle à une redéfinition des besoins et des modes de consommation, car les risques d'épuisement de ressources non renouvelables telles que le pétrole, le gaz naturel et le charbon largement exploités sont en voie de disparition. Faute de nouvelles découvertes. Le réchauffement climatique et catastrophes nucléaires, font apparaître clairement que le modèle énergétique actuel n'est pas durable. Il est donc nécessaire d'engager une transition vers un modèle qui serait plus durable pour les besoins des générations présentes et futures. [1]

L'énergie étant devenue un élément fondamental dans tous les domaines à cause de nos différentes exigences en plusieurs termes domestiques industriels et autres innovations. Face à l'épuisement des ressources naturelles à la raréfaction du pétrole aux dangers des énergies fossiles aux coûts constants à leur dangerosité quant à la dégradation de l'environnement face au défi de réduire d'urgence les émissions à effet de gaz (GES) qui ont entraîné des catastrophes environnementales dévastatrices sur tous les continents ou les pays en voie de développement ont été les plus vulnérables et face à la demande énergivore mondiale sans cesse croissante le monde s'est vu contraint à une prise de conscience à réfléchir de plus en plus à modifier son mode de production et de consommation énergétique à une fin écologique et c'est pourquoi partout dans le monde se développe l'idée de transition écologique par de nouvelles techniques de production d'énergie renouvelable. Depuis l'aube de l'humanité, la production de l'énergie était basée en une grande partie sur les combustibles comme le bois, les fossiles (charbon, pétrole, gaz...), puis l'uranium. Mais le grand problème accompagnant l'utilisation de ces matières est l'émission de gaz et les dégagements massifs de composés divers ; ce qui déséquilibre notre planète par l'émission directe de plusieurs millions de tonnes de CO₂ provoquant des degrés élevés de la pollution et de la température ; ainsi que la réduction des réserves naturelles. Alors, on a besoin de chercher d'autres solutions alternatives aux énergies fossiles pour produire l'électricité avec des sources renouvelables non polluantes et plus économiques en exploitant bien les éléments de la nature comme l'eau, le soleil et le vent. [2]

Les défis actuels et futurs de l'Algérie, tels que la forte croissance de la population, l'urbanisation rapide, le développement accéléré et la hausse de la demande énergétique, pourraient s'intensifier en sachant que la population Algérienne augmente de 1,5 à 3% par an

de sorte que nous doublons notre population tous les 40 ans. La consommation d'énergie au niveau national augmente année après année en raison du développement démographique et urbain, en plus du développement économique en constante progression.

Les besoins énergétiques de l'Algérie étant couverts par des hydrocarbures, principalement du gaz naturel. Les autres formes d'énergie ne sont mobilisées que lorsque le gaz naturel ne peut pas être utilisé. La consommation d'électricité devrait atteindre 75 à 80 TWh en 2020 et 130 à 150 TWh en 2030, à long terme, l'extension du modèle national de consommation d'énergie peut affecter l'équilibre existant entre l'offre et la demande pour cette source d'énergie. Le déséquilibre entre la production et la consommation entraîne des grandes pannes dans le réseau électrique comme le délestage, le blackout et par conséquent des pertes économiques énormes. Afin de satisfaire cette nouvelle demande, les réseaux électriques existants doivent être renforcés pour assurer la qualité d'alimentation nécessaire. [3]

Le recours aux énergies renouvelables est impératif pour un pays comme l'Algérie qui dispose d'un climat favorable pour le développement et l'expansion du secteur des énergies renouvelables surtout dans la production d'électricité. L'Algérie dispose d'un potentiel énergétique très important, c'est pour cela que l'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte. [4]

C'est dans cet objectif que vient s'insérer notre étude qui porte sur l'une des énergies renouvelables en développement à ce moment qui est l'énergie éolienne.,[4] cette étude s'intéresse de la 1^{er} ferme éolienne d'Algérie dans la zone d'Adrar (Kabertene) qui est le cœur de 1^{er} expérience de la Sonelgaz en Algérie et particulièrement dans le domaine de production d'électricité sur le réseau connecté par l'énergie éolienne et ces aérogénérateurs sont équipées par des systèmes de commande et de sécurité afin d'assurer un bon fonctionnement dans les différentes conditions.[2]

Notre travail se focalise sur l'intérêt d'intégration d'un parc éolien dans le réseau Sud-Ouest de l'Algerie

C'est donc dans ce cadre que nous allons développer notre étude à travers les chapitres suivants :

- ❖ **Dans le premier chapitre** nous allons présenter et définir les énergies renouvelables ; leurs principales sources les différents types d'énergie et leur évolution dans le monde.

- ❖ **Dans le deuxième chapitre** nous aborderons les généralités sur la situation énergétique ; les émissions de gaz à effet de serres (GES), de la pandémie du coronavirus 19 et ses répercussions sur l'économie Algérienne et de la crise économique en Algérie et pourquoi l'Algérie doit axer sa stratégie sur des ressources durables et inépuisables comme le solaire (dont le gisement est l'un des plus élevé au monde) ou l'éolien (dont le potentiel est caractérisé par des vitesses plus élevées au sud 5m/s à 7m/S et au nord entre 4m /s à 6m/s) . Les énergies renouvelables comme solution, le programme national et efficacité énergétique, le programme national de développement des énergies renouvelables et leur perspective nous parlerons aussi du potentiel des énergies renouvelables en Algérie et les gisements éoliens existants.
- ❖ **Le troisième chapitre** sera consacré à l'écoulement de puissance ; l'historique des systèmes électriques, le but de l'écoulement de puissance et les méthodes de résolution de l'écoulement de puissance. Nous expliquerons pourquoi le logiciel PSAT/MATLAB est utilisé pour l'analyse des réseaux électriques dans nos travaux et en quoi ce logiciel est le plus adapté à notre problématique.
- ❖ **Le quatrième chapitre** est consacré à la réalisation du réseau réel PIAT(Ine Salah-Adrar-Timimoune) et une partie du réseau RIN (**réseau Interconnecté du Nord**) simulé sur PSAT et à la comparaison entre le réseau réel actuel et les différentes variantes de simulation pour l'amélioration de ce réseau (Avec et sans l'injection d'un parc éolien et PV) . que nous avons figuré à échelle réduite sur une maquette .

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude.

Chapitre I

I.1 Introduction

L'électricité, forme propre de l'énergie par excellence, est aujourd'hui produite, à près de 80 %, grâce à la combustion des carburants fossiles ou de l'uranium, ressources épuisables. Elle contribue ainsi abondamment à la production de déchets nuisibles pour l'environnement. Les ressources énergétiques renouvelables sont pourtant considérables et parfaitement capables de satisfaire la majeure partie de nos besoins. Mais outre l'hydroélectricité, technologie parfaitement mature, les solutions de conversion des ressources renouvelables, que sont le soleil, le vent, la houle, la biomasse, etc...., sont encore en phase de décollage industriel et ne représentent qu'une faible part dans le bilan global. Après de nombreux soubresauts, les contraintes environnementales, le rapprochement de l'échéance d'épuisement des ressources fossiles et fissiles ainsi que les soucis d'indépendance énergétique conduisent depuis la crise pétrolière de 1973 à relancer de nouvelles recherches des filières de production d'électricité d'origine renouvelable, qualifiées de nouvelles, c'est-à-dire hors «hydroélectricité».[5]

Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres, L'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre, ne produisent pas de déchets ; elles sont inépuisables ; elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux ; elles offrent une importante indépendance énergétique.[1]

I.2 Définition des énergies renouvelables

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humain .les énergie renouvelable sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par l'astre, principalement le soleil (rayonnement), mais aussi la lune (marée) et la terre (énergie géothermique). [6]

Soulignons que le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse de laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. [7]

Les énergies renouvelables fournissent aujourd'hui plus d'un quart (26%) de la production mondiale d'électricité

I.3 Les principales sources d'énergies renouvelables:

La source principale des énergies renouvelables est le soleil. Son flux d'énergies peut être utilisé directement grâce à une technologie thermique ou photovoltaïque, ou indirectement grâce au vent, aux vagues, aux barrages sur rivière et aux biocarburants. On peut souvent considérer comme sources d'énergies renouvelables l'énergie des marées et l'énergie géothermique provenant du centre de la terre (figure I.1). [7]

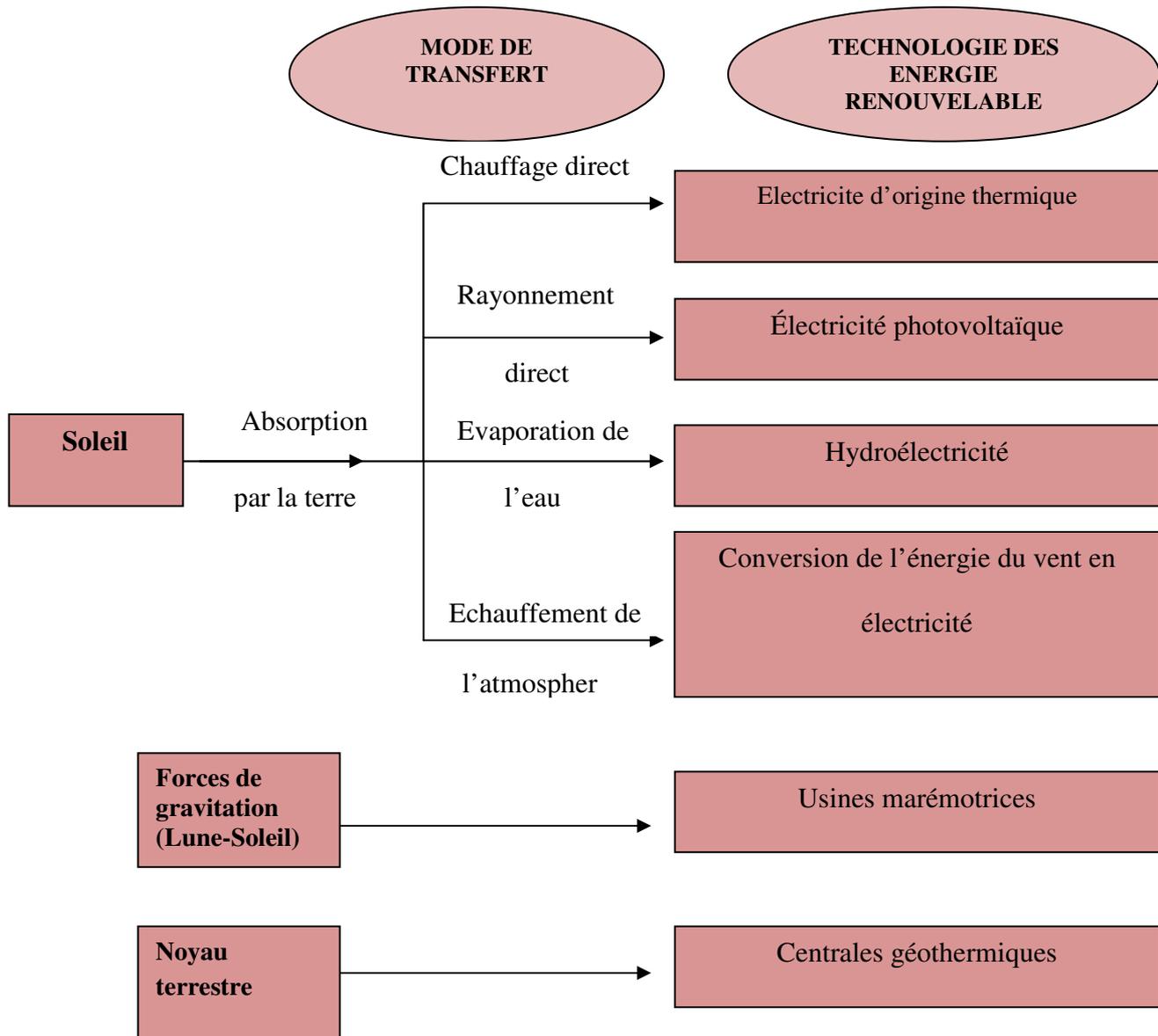


Figure (I-1) : Schéma des principales sources d'énergies renouvelables

I.4 Les différents types d'énergies renouvelables :

I.4.1 L'énergie solaire

Ce terme désigne l'énergie fournie par les rayons du soleil. Le soleil est la source d'énergie la plus puissante et cette énergie est gratuite, il n'y a qu'à l'exploiter ! Les technologies sont réparties entre actives et passives. Les technologies actives transforment l'énergie solaire en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement, à partir de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique. [8]

I.4.1.1 Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. [9]

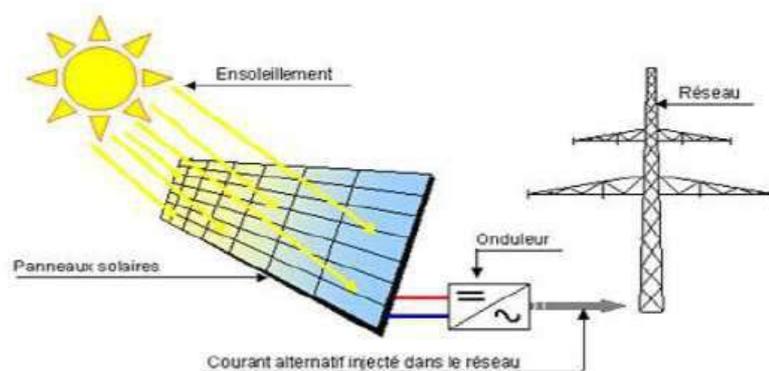


Figure (I-2) : Système PV raccordé au réseau

Dans le cadre économique actuel favorisant l'insertion de l'énergie solaire, c'est-à-dire avec une incitation financière forte en faveur de l'énergie photovoltaïque et un marché de

l'électricité libéralisé. Dans ce cas, le stockage couplé au réseau peut avoir de nombreuses applications. [9]

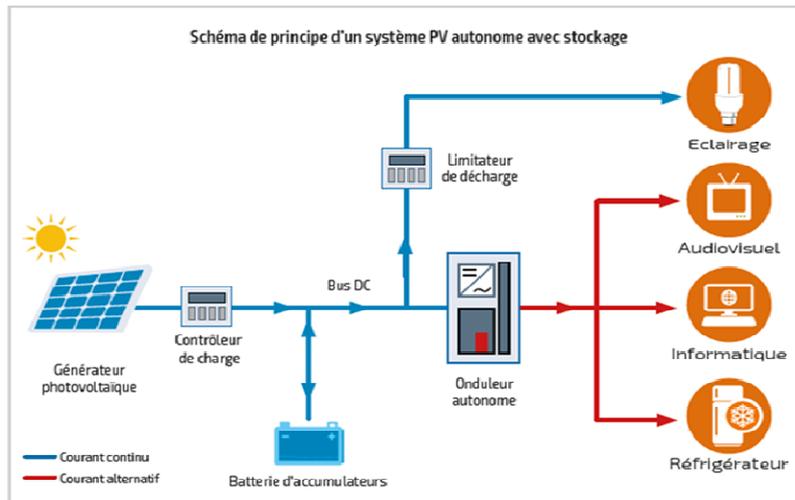


Figure (I-3) : Système photovoltaïques avec stockage

I.4.1.2 L'énergie solaire thermique

Une des façons de profiter directement de l'énergie des photons émis par le soleil est le chauffage direct des capteurs thermiques. Ils se comportent comme une serre où les rayons du soleil cèdent leur énergie à des absorbeurs qui à leur tour réchauffent le fluide circulant dans l'installation de chauffage. La température du fluide peut atteindre jusqu'à 60 à 80°C. Ce système est totalement écologique, très peu cher et la durée de vie des capteurs est élevée. Une autre propriété qui rend ce type des capteurs universels est que l'ensoleillement ne doit pas forcément être direct ce qui signifie que, même dans les zones couverts de nuages (peu denses évidemment) le fonctionnement reste correct.

Le grand inconvénient est l'impossibilité de transporter l'énergie ainsi captée à grande distance. [5]

I.4.2 L'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Le couplage mécanique peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire.[10]

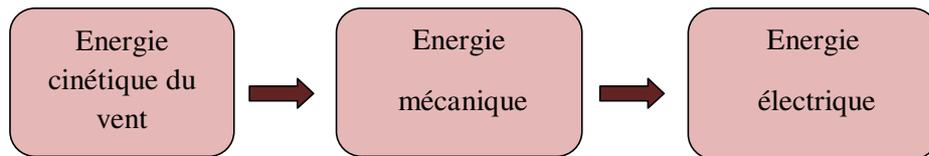


Figure (I-4) : Conversion de l'énergie cinétique du vent



Figure (I-5) : Photos d'un parc éolien

I.4.3 L'énergie de la biomasse

L'utilisation de la biomasse remonte au temps où l'homme découvrait le feu et se servait encore du bois pour se chauffer et cuire ses aliments ! Il s'agit de l'énergie contenue dans les plantes et les matières organiques. La biomasse des plantes provient du soleil, quand la plante, grâce à la photosynthèse, absorbe l'énergie solaire. Ensuite, les animaux absorbent à leur tour ces plantes ! La biomasse provient de divers secteurs et matières comme le bois, les récoltes (cultivées spécialement pour la production d'énergie), les résidus agricoles et forestiers, les déchets alimentaires et les matières organiques issues des déchets municipaux et industriels. Il existe toute une variété de technologies pour convertir l'énergie de la biomasse en une forme réutilisable. Ces technologies changent l'énergie en formes utilisables directement (chaleur ou électricité) ou en d'autres formes telles que le biocarburant ou le biogaz. [8]



Figure (I-6) : L'énergie biomasse

I.4.4 L'énergie hydraulique

L'eau est également une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité. [8]



Figure (I-7) : L'énergie Hydraulique

I.4.5 L'énergie géothermique

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique. Elle est parfois libérée à la surface par des volcans ou des geysers, mais elle peut aussi être accessible à tout moment, comme dans les sources d'eau chaude. La géothermie peut servir à produire de l'électricité ou à chauffer et refroidir.

L'énergie est extraite de réservoirs souterrains enfouis très profondément et accessibles grâce au forage, ou de réservoirs plus proches de la surface. L'énergie géothermique peut également être employée dans un but domestique, grâce aux petites pompes à chaleur.[8]



Figure (I-8): L'énergie géothermie

I.5 Evolution des énergies renouvelables dans le monde

Partout dans le monde, la conjonction de l'instabilité des marchés des énergies fossiles et l'impératif de protection de l'environnement et de réduction des émissions de gaz à effet de serre imposent une révision des stratégies énergétiques. Les énergies renouvelables disposent d'atouts essentiels pour prendre la première place dans les bouquets énergétiques des pays.

Les énergies renouvelables constituent une réponse particulièrement adaptée aux besoins énergétiques considérables des pays émergents qui assurent aujourd'hui l'essentiel de la croissance mondiale. Elles permettent de valoriser leurs ressources naturelles, hydraulique, ensoleillement, vent, biomasse ..., de rapprocher les sites de production des centres de consommation et de réduire la dépendance de ces pays aux énergies fossiles. Elles se prêtent également à des productions locales d'équipements qui ajoutent encore à leur intérêt.

Les énergies renouvelables contribuent à la sécurité d'approvisionnement et à l'indépendance énergétique de tous les pays. Produites à partir de ressources naturelles et locales ; pour la plupart infinies à l'échelle mondiale.

Actuellement, ce sont les coûts de développement des technologies et des investissements dans les équipements de production (turbines éoliennes, modules solaires, chaudières biomasse, etc.) qui pèsent sur le coût des énergies renouvelables. A l'avenir, les énergies renouvelables deviendront les énergies les moins chères et aux prix les plus stables. Aujourd'hui, rejoignant les coûts de production de l'hydroélectricité, certaines technologies comme l'éolien terrestre ont pratiquement atteint la parité avec les coûts de l'électricité

thermique, tandis que d'autres filières comme le solaire photovoltaïque ou la biomasse réduisent considérablement leur écart initial de compétitivité. Bénéficiant d'un marché mondial, d'un flux d'innovations technologiques régulières et de dispositifs d'incitation financière variés, l'investissement dans les équipements de production décentralisé est stimulé par la perspective de produire, très bientôt, de l'énergie à des conditions compétitives, avec des coûts d'exploitation très réduits par rapport aux autres sources d'énergie.

Les énergies renouvelables contribuent à limiter les impacts de la production d'énergie sur l'environnement. Diminution des émissions de gaz à effet de serre, réduction des effets sur l'air, l'eau et les sols, absence de production de déchets, les installations de production d'énergies renouvelables affectent très peu l'environnement, la biodiversité et le climat. Elles sont donc appelées à jouer un rôle important dans la lutte contre le changement climatique et pour la santé humaine. [24]

L'année 2016, 161 GW d'énergies renouvelables ont été installées : un nouveau record qui augmente la capacité totale de production d'électricité d'origine renouvelable de près de 9% par rapport à 2015, pour atteindre environ 2 017 GW. Le solaire photovoltaïque compte pour environ 47% de ces capacités additionnelles, suivi de l'éolien (34%) et l'hydroélectricité (15,5%).

Au niveau mondial, les énergies renouvelables représentent dorénavant 19,3 % de la consommation finale d'électricité contre 78,4 % pour les combustibles fossiles et seulement 2,3 % pour le nucléaire. [25]

Les énergies renouvelables devraient voir leurs capacités croître de 50% dans le monde d'ici 2024, tirées notamment par les petites unités solaires, un bond "encourageant", même s'il reste insuffisant pour remplacer les énergies fossiles, selon un rapport de l'Agence internationale de l'énergie (AIE).

Après un tassement en 2018, lié à des réorientations budgétaires en Chine, le secteur est reparti à la hausse avec une croissance à deux chiffres anticipée par l'AIE pour 2019.

Et pour les 5 ans à venir, l'agence prévoit 1.200 GW gigawatts de capacités nouvelles, soit l'équivalent de la capacité électrique actuelle des Etats-Unis toutes sources confondues.

Poussées par des politiques gouvernementales et la chute des coûts, les renouvelables passeraient ainsi de 26% à 30% de la production d'électricité mondiale (derrière le charbon à environ 34%). [26]

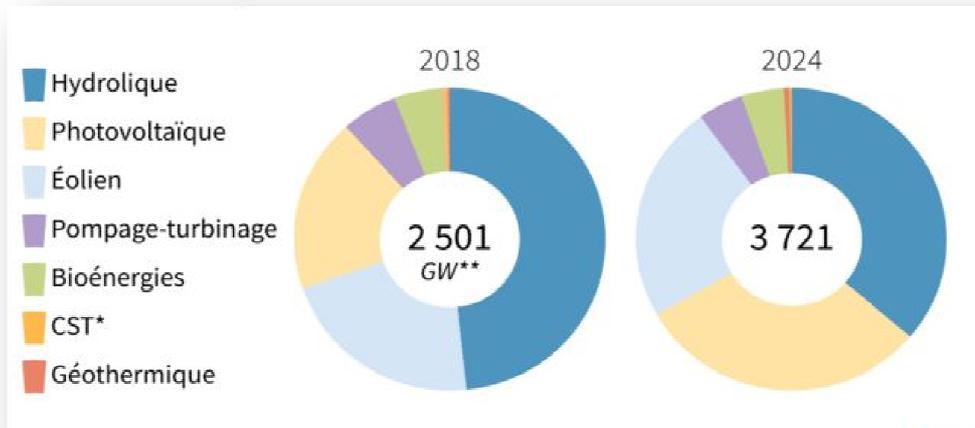


Figure (I-9) : Les énergies renouvelables dans le monde

I.5.1 Evolution de l'énergie Photovoltaïque dans le monde

En 2016, près de 75 GW de panneaux photovoltaïques ont été installés dans le monde. Cela équivaut à l'installation de plus de 31 000 panneaux photovoltaïques par heure et représente une croissance de 48 % par rapport à 2015.

La Chine est le premier producteur d'électricité à partir du solaire photovoltaïque avec 75,25 TWh (22,9 % de la production mondiale), le Japon occupent la deuxième place (50,95 TWh soit 15,5 %) et l'États-Unis, la troisième place (46,63 TWh soit 14,2 %). Philippines 756 MWh installés en 2016, portant la puissance cumulée à 1 400 MW. La France est dans le Top 10 avec une production de 8,16 TWh soit 2,5 % de la production mondiale.

La production d'électricité à partir du solaire photovoltaïque représente 1,5 % de la production mondiale d'électricité. En Europe, la Grèce, l'Italie et l'Allemagne ont une production d'électricité à partir du solaire photovoltaïque qui correspond à plus de 7 % de la consommation d'électricité nationale.

A la fin 2016, la capacité installée du parc mondial solaire photovoltaïque a dépassé 300 gigawatts (GW) installés, selon la PV Market Alliance. [27]

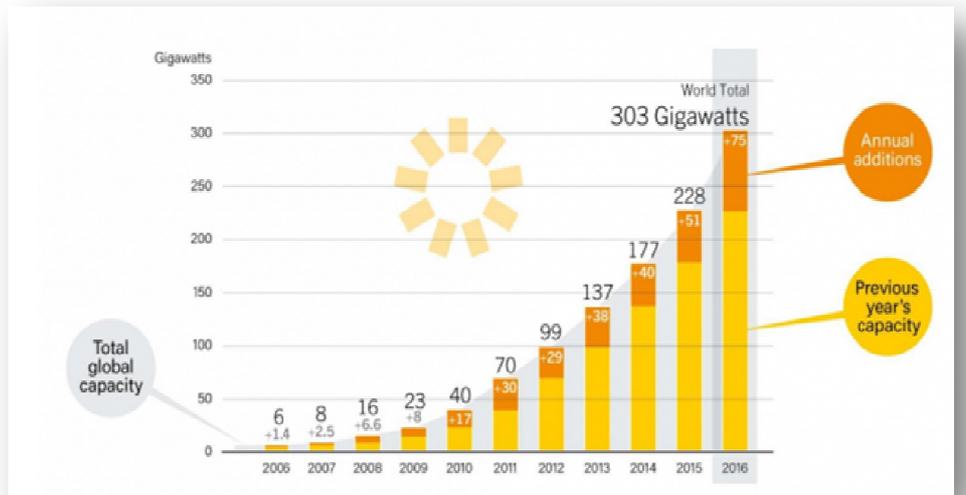


Figure (I-10) : Evolution de l'énergie photovoltaïque dans le monde en 2016

En 2017, le solaire a dominé les investissements mondiaux dans la production électrique comme jamais au paravent. Le chiffre record de 98 gigawatts de capacité additionnelle en solaire a été atteint au niveau mondial, bien plus que les ajouts nets de toute autre technologie - renouvelable, combustibles fossiles ou nucléaire. [28]

Pays	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	% 2017	2018*
 Chine	0,7	2,6	6,4	15,5	29,2	44,8	75,3	130,7	29,5 %	177,5
 États-Unis	3,1	5,3	9,2	14,9	23,1	32,1	46,6	67,4	15,2 %	92,6
 Japon	3,5	4,8	6,6	12,9	23,0	34,8	51,0	55,1	12,4 %	71,7
 Allemagne	11,7	19,6	26,4	31,0	36,1	38,7	38,1	39,4	8,9 %	46,2
 Inde	0,1	0,8	2,1	3,4	4,9	5,6	14,1	26,0	5,9 %	30,7
 Italie	1,9	10,8	18,9	21,6	22,3	22,9	22,1	24,4	5,5 %	22,7
 Royaume-Uni	0,04	0,2	1,4	2,0	4,1	7,5	10,4	11,5	2,6 %	12,9
 France	0,6	2,1	4,0	4,7	5,9	7,3	8,2	9,6	2,2 %	10,2
 Espagne	6,4	7,4	8,2	8,3	8,2	8,3	8,1	8,5	1,9 %	7,8
 Australie	0,4	1,4	2,3	3,5	4,0	5,0	6,2	8,1	1,8 %	12,1
 Corée du Sud	0,8	0,9	1,1	1,6	2,6	4,0	5,1	7,1	1,6 %	9,3
 Thaïlande	0,1	0,1	0,5	1,0	1,6	1,9	2,7	4,5	1,0 %	4,7
 Grèce	0,2	0,6	1,7	3,6	3,8	3,9	3,9	4,0	0,9 %	3,8
 Chili				0,01	0,5	1,3	2,6	3,9	0,9 %	5,1
 Canada	0,3	0,6	0,9	1,5	2,1	2,9	3,1	3,6	0,8 %	3,5
 Belgique	0,6	1,2	2,1	2,6	2,9	3,1	3,1	3,3	0,7 %	3,6
 Afrique du Sud				0,05	1,1	2,2	2,6	2,6	0,6 %	4,9
 Pays-Bas	0,06	0,1	0,2	0,5	0,8	1,1	1,6	2,2	0,5 %	3,2
Monde	32,2	63,2	99,0	139,5	190,2	250,2	328,0	443,6	100 %	584,6

Tableau (I-1) : Production d'électricité solaire photovoltaïque dans le monde (TWh)

La capacité totale de production d'énergie solaire en Afrique, de 2008 à 2018. Ainsi, la capacité de production africaine était en développement au cours de cette période. En 2018, la capacité de production sur le continent africain s'élevait à plus de 6.000 MW, tandis qu'en 2009, elle était de 108 MW. [29]

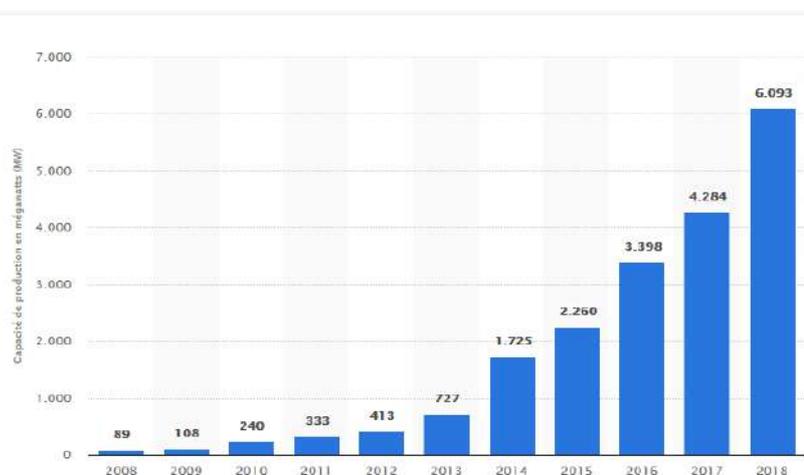


Figure (I-11) : La capacité totale de production d'énergie solaire en Afrique, de 2008 à 2018.

❖ Les principaux producteurs de photovoltaïque dans le monde

Canada : en 2018, seulement 100 MWc ont été installés, contre 249 MWc en 2017; puissance cumulée fin 2017 : 2 900 MWc

Mexique : 2 700 MWc installés en 2018 ; en 2017, 150 MWc installés, puissance cumulée : 539 MWc

Chili : 461 MWc installés en 2018, contre 657 MWc en 2017 ; puissance cumulée fin 2017 : 1 800 MWc.

Brésil : moins de 400 MWc installés en 2018 ; en 2017, 910 MWc installés, puissance cumulée : 1 GWc

Honduras : démarrage avec 389 MWc installés en 2018

Thaïlande : 251 MWc installés en 2017, portant la puissance cumulée à 2 700 MWc.

Taïwan : 523 MWc installés en 2017, portant la puissance cumulée à 1 800 MWc

Pakistan : 800 MWc installés en 2017, portant la puissance cumulée à 1 800 MWc

Malaisie : 50 MWc installés en 2017, portant la puissance cumulée à 286 MWc

Algérie : 270 MWc installés en 2015, portant la puissance cumulée à 300 MWc ; seulement 50 MWc installés en 2017, mais un appel d'offres pour 4 GWc est annoncé pour 2018

Égypte : plus de 1 700 MWc installés en 2019.

Maroc : les centrales solaires en exploitation fin 2019 totalisent 700 MW, dont 192 MW en photovoltaïque : Noor Ouarzazate IV (72 MW), Noor Laâyoune I (80 MW), Noor Boujdour I (20 MW) et Aïn Beni Mathar (20 MW).

Sénégal : 50 MWc installés à fin juillet

En 2017, au niveau mondial, la production d'électricité solaire photovoltaïque atteignait 443,6 twh, soit 1,7 % de la production mondiale d'électricité ;

En 2018, elle est estimée à 585 Twh ; l'agence internationale de l'énergie estime qu'avec les installations existantes fin 2018, cette part est passée à 2,6 %, et prévoit qu'elle pourrait atteindre 16 % en 2050. En 2018, quatre pays concentrent plus des deux tiers de la puissance installée photovoltaïque : la Chine (35 %), les Etats-Unis (12 %), le Japon (11 %) et l'Allemagne (9 %).

Les énergies renouvelables devraient permettre au solaire photovoltaïque de croître de 42% dans l'union européenne, soit une part de 12% du marché mondial des implantations solaires PV 13.5 GW de PV en Europe en 2019. [30]

D'après une série de prévisions d'experts du secteur des énergies renouvelables pour cette nouvelle année 2019, la capacité de production d'énergie solaire en Europe devrait passer de 9,5 gigawatts à 13,5 GW soit une augmentation de plus de 42% d'ici fin 2019. Avec un tel volume, l'union européenne devrait représenter 12% du marché mondial des modules solaires installés. Il faut dire que les énergies renouvelables ont connu une renaissance mondiale en 2018.

En outre, la Pologne - le plus grand consommateur de charbon en Europe - a entamé sa transition vers les énergies renouvelables. Sans investissement ce groupe a notamment commencé à alimenter 24 MWc de son portefeuille polonais de 43 MW en 2018. Il représente à lui seul 15% de l'ensemble du marché polonais de l'énergie solaire à savoir le plus grand portefeuille photovoltaïque de la région Europe centrale et orientale.

Au cours des six premiers mois de 2018, l'Allemagne, voisin de la Pologne, a pour sa part établi un nouveau record en matière d'énergie renouvelable après avoir fourni 41,5% de son électricité à partir de l'énergie solaire, éolienne et de la biomasse; une augmentation de 4% par rapport à l'année précédente. [31]

Compte tenu de l'évolution des mentalités vis-à-vis des énergies renouvelables en provenance même des pays européens les plus favorables au charbon et de la suppression des droits de douane sur les panneaux solaires chinois, les investissements dans l'énergie solaire et les énergies renouvelables en générale deviendront plus attrayants que jamais pour les investisseurs en 2019, a commenté Andrius Terskovas, directeur du développement des Affaire du groupe d'investissement.[32]

Ces affirmations sont corroborées par les prévisions selon lesquelles l'une devrait représenter 12% de la part de marché mondiale des modules solaires et un certain nombre d'états membres, dont les Pays-Bas et l'France, devraient dépasser la capacité installée de 1GW l'année prochaine, avec un intérêt solide à travers l'Europe pour les énergies renouvelables et une incitation politique de Bruxelles poussant les membres de l'une vers un avenir plus vert



Figure (I-12) : Le plus grand parc photovoltaïque d'Europe qui s'étendra sur 1.981 hectares verra le jour en 2022-2023 dans le Lot-et-Garonne et sera financé à 100% par cinq opérateurs du secteur des énergies renouvelables

L'Agence internationale de l'énergie prévoyait, en octobre 2019, que 1 200 GW de capacités supplémentaires d'énergies renouvelables seront installées d'ici à 2024, une augmentation du 50 % du parc installé, et que le solaire représentera près de 60 % de cette augmentation, grâce à la baisse des coûts des cellules photovoltaïques, qui devraient encore reculer de 15 % à 35 % d'ici 2024. La croissance prévue par l'AIE est cependant insuffisante pour tenir les objectifs de l'accord de Paris : il faudrait installer 280 GW par an de capacités renouvelables pour y parvenir.

La Chine est l'incontestable leader mondial du solaire PV avec 45 GW installés en 2018 (une capacité cumulée de 176 GW), l'Inde est le numéro 2 avec 11 GW installés, et les Etats-Unis en 3^{ème} position avec 10,6 GW, suivis de près par le Japon avec une puissance cumulée de 56 GW et l'France en 4^{ème} position avec 45,4 GW, la France venant en 9^{ème} position avec 9 GW.

On observe que l'ensemble des pays de l'UE n'ont augmenté leur puissance installée que de 8,3 GW l'an dernier, mais avec une puissance cumulée de 115 GW.

S'agissant de la production d'électricité, on observe que l'France qui n'est pas un pays où le soleil est particulièrement généreux, produit 8% de son électricité avec la filière PV (la Grèce et l'France près de 7, 5 % chacune et la France seulement 2,2%). Enfin, remarquons que l'énergie solaire n'assure que 3% de la production électrique mondiale (l'éolien 7% et l'hydraulique 17%).

La Chine devrait installer près de 1 300 GW d'énergies renouvelables d'ici à 2025, soit 33 % des nouvelles capacités mondiale.



Figure (I-13) : Le projet vert de éco-cité, qui ouvrira en 2020 dans la chine

Le projet le plus « vert » est la création d'une éco-cité, qui ouvrira en 2020 : couverte de végétation et de panneaux photovoltaïques, cette ville de 30 000 habitants absorbera 10 000 tonne de CO₂ par an, tout en produisant 900 tonnes d'oxygène.

La Chine va vraisemblablement atteindre et peut-être même dépasser son objectif de tirer 15 % de son énergie des énergies renouvelables d'ici 2020, selon le nouveau rapport établi par l'Institut Worldwatch. Si la Chine poursuit sa volonté de diversifier ses ressources énergétiques et de devenir le numéro un mondial dans l'industrie des énergies renouvelables, ces dernières pourraient fournir plus de 30 % de l'énergie du pays d'ici 2050. [33]

❖ Le solaire flottant dans le monde

Après le Japon, pays pionnier, la Chine s'est lancée dans la technique du solaire photovoltaïque flottant, avec le gigantisme que lui permet la variété de son territoire. Le parc de Huainan, dans la province d'Anhui, est entré en activité, avec une capacité de 40 mégawatts (MW), et une autre installation de 150 MW dans la même région en 2019.



Figure (I-14) : Le plus grand parc solaire flottant du monde

Le Japon a pris 50 installations de plus d'1 MW et plusieurs dizaines d'autres encore en projet, le plus grand parc japonais (13,7 MW) a été inauguré à Chiba, près de Tokyo, à proximité d'un barrage hydro-électrique, complétant ainsi sa production. Une petite société française, basée à Lille, Ciel et Terre, a été depuis 2006 au cœur du développement de cette filière en s'associant à un partenaire japonais Kyocera TCL Solar.

L'Inde, qui a beaucoup de lacs d'irrigation (36 000 dans le seul État du Karnataka), a annoncé un ambitieux programme soutenu par les pouvoirs publics. L'Australie aussi s'est mise sur les rangs.

Mise à part le Royaume-Unis, qui a deux des dix plus grands parcs mondiaux (le queen elizabeth reservoir près de Londres et le godley reservoir près de Manchester), les pays européens, comme la Belgique, le Danemark, l'Italie ou le Portugal, ont jusqu'à présent privilégié des installations de moins d'1MW. La commune alsacienne d'illkirch, dans la banlieue de Strasbourg, finalise une petite installation sur un étang pour les besoins des services municipaux mais elle rencontre l'opposition d'écologistes. [34]

I .5.2 Evolution de l'énergie Solaire thermique

Le désert de gobi, une source d'énergie. C'est là que se dresse la plus grande centrale solaire asiatique, terminée le 27 décembre 2018

C'est la première centrale solaire chinoise qu'une capacité de 100 mégawatts (MW), la plus grande en Asie. D'autres centrales solaires à concentration existent bien sûr ailleurs dans le monde, comme par exemple celle d'Ivanpah, installée en Californie, dans le désert du Mojave : elle produit à elle seule 30% de l'énergie solaire thermique des Etats-Unis. [35]



Figure (I-15) : La plus grande centrale solaire asiatique a concentration 2018

Le début 2019. Record mondial ! La plus puissante des quatre centrales nord-américaines, qui détenait jusqu'alors ce privilège, plafonne à 392 MW.

Février 2019, Le Maroc a inauguré une centrale à concentration sur 3000 hectares, la plus puissante au monde. Un des objectifs est de fournir de l'électricité "propre" à l'Europe. [36]



Figure (I-16) : Le complexe de Noor, près de Ouarzazate, Maroc

Dubai et son projet de la plus grande centrale solaire au monde. C'est dans la première ville des Émirat Arabes Unis, Dubai, que la société française (fournisseur d'équipement d'énergie solaire) Enerconfort découvre un projet d'énergie renouvelable plutôt exceptionnelle : une centrale solaire géante pouvant générer 1 000 mégawatts d'ici 2030 ce projet énergétique devrait finir d'ici 2021, fournissant à cette date des rendements proche à 200 mégawatts. Mais ce projet sera très loin d'être fini, car d'ici 2030, ils prévoient une concentration d'électricité de 1 000 MW. [37]



Figure (I-17) : La plus grande centrale solaire dans le monde en 2030, Dubai

❖ 8.000 TWh d'électricité renouvelable en 2022

L'AIE estime que les bons résultats du secteur solaire devraient devenir une tendance pour les prochaines années. L'énergie photovoltaïque devrait en effet croître plus rapidement que toutes les autres sources d'électricité au cours des 5 prochaines années : selon un scénario de référence, le parc photovoltaïque mondial devrait atteindre 740 GW d'ici l'horizon 2022 (contre près de 300 GW fin 2016).

Ces nouvelles perspectives ont poussé l'AIE à revoir ses prévisions de 12% à la hausse : l'agence estime en effet que le parc renouvelable aura progressé de quasiment 1.000 GW en 2022. 40% de ces nouvelles capacités auront vu le jour en Chine (363 GW), aux États-Unis (123 GW) et en Inde (107 GW).

Ainsi, la production électrique renouvelable devrait dépasser la barre des 8.000 TWh en 2022 (soit la consommation électrique annuelle de la Chine, de l'Inde et de l'Allemagne). La part des énergies renouvelables dans le mix électrique devrait à ce moment-là atteindre les 30% (contre 24% en 2016). "Bien que le charbon demeurera la principale source de production

d'électricité en 2022, les énergies renouvelables auront réduit l'écart de production avec le charbon de moitié en seulement cinq ans". [38]

❖ Le solaire pourrait être la première source d'électricité en 2050 (AIE)

L'Agence Internationale de l'Energie (AIE), organisation fondée par l'OCDE, considère dans ses feuilles de route technologiques que 27% de l'électricité mondiale pourrait être produite à partir du solaire d'ici à 2050. L'énergie solaire serait alors la première source d'électricité devant les énergies fossiles, l'hydroélectricité, l'éolien ou encore le nucléaire. Toutefois, les conclusions de l'AIE restent au conditionnel.

L'Agence Internationale de l'Energie a publié le lundi 29 septembre 2014 deux nouvelles feuilles de routes sur les technologies de l'énergie, plus précisément concernant le solaire thermique et le photovoltaïque. Selon les conclusions de ces rapports, ces deux énergies renouvelables pourraient représenter respectivement 11% et 16% de la production mondiale. [39]

I.5.3 Evolution de l'énergie éolienne

L'Europe est un acteur majeur de la production d'électricité d'origine éolienne derrière l'Asie (Chine et Inde) et l'Amérique du Nord.

L'Europe a été pionnière dans le développement de l'éolien puis l'Asie et l'Amérique du Nord ont largement pris la tête, installant durablement l'éolien comme source de production d'électricité, soutenue par des politiques de baisse d'émissions de CO₂.

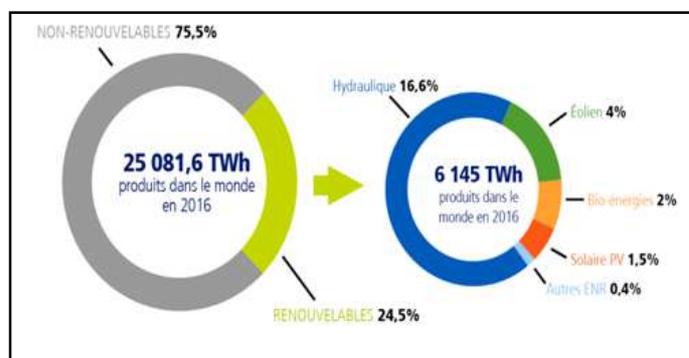


Figure (I-18): Part des renouvelables dans la production mondiale d'électricité en 2016

En 2017, la capacité installée mondiale de l'éolien en mer (ou éolien offshore), s'élève à 18,81 GW. Cela représente une progression + 23 % par rapport à 2016.



Figure (I-19): Le parc éolien de Teesside dans le Nord-Est de l'Angleterre

❖ Principaux producteurs

En 2016, La Chine est le premier producteur d'électricité à partir de l'éolien avec 237,07 TWh (24,7% de la production mondiale), les Etats-Unis occupent la deuxième place (229,47 TWh soit 24 %) et l'Allemagne, la troisième place (78,6 TWh soit 8,2 %). La France est dans le Top 10 avec une production de 21,4 TWh soit 2,2 % de la production mondiale.

Le Royaume-Uni (6,84 GW), l'Allemagne (5,35 GW) et la Chine (2,79 GW) occupent le podium des plus grands parcs éoliens en mer.

Avec la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte, promulguée le 18 août 2015, la France s'est fixée pour objectif d'atteindre 32 % d'énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie de la France à horizon 2030.

Avec 108 GW installés, l'Allemagne possède le parc le plus important devant l'Italie (60,8 GW) et l'Espagne (51,9 GW). Le parc français est le quatrième plus important d'Europe avec 13,6 GW de capacités installées en 2017. [40]



Figure (I-20) : Puissance de l'éolien raccordée par région en 2017

Le 31 décembre 2018

- Allemagne : 58 908 MW
- Espagne : 23 494 MW
- Royaume-Uni : 21 243 MW
- France : 15 108 MW [41]

Le parc éolien offshore de 1 200 mégawatts (MW) devra être construit d'équipements provenant d'au moins 60% en Turquie et réalisé par 80% d'ingénieurs turcs.

La date limite pour participer à l'appel d'offres pour le premier et le plus grand parc éolien offshore de Turquie avait été fixée au 23 octobre 2018.

En 2017, la production d'électricité à partir de l'énergie éolienne s'est élevée à 17 909 GWh, soit 6,06% de la production totale d'électricité du pays.

La plus grande centrale éolienne offshore du monde est actuellement située au Royaume-Uni avec une capacité de 630 mégawatts. Avec une capacité totale de 6 183 mégawatts, le Royaume-Uni a la plus grande capacité éolienne offshore. L'Angleterre est suivie par l'Allemagne et la Chine respectivement. [42]

Istanbul – La capacité éolienne totale de la Turquie atteindra 8 Gigawatts (GW), avec l'ajout de 600 Mégawatts (MW) supplémentaires, a affirmé le président de l'Association turque de l'énergie éolienne, Mustapha Sardar Atacifine. [43]



Figure (I-21) : Le parc éolien offshore en Turquie

La production d'électricité éolienne de l'Allemagne a atteint 112,3 TWh en 2018 (93,9 TWh sur terre et 19,4 TWh en mer - données provisoires), soit 17,5 % de la production brute totale d'électricité du pays, en progression de 6,3 % par rapport à 2017 : 105,6 TWh (87,9 TWh sur terre et 17,7 TWh en mer).

Selon l'Agence internationale de l'énergie, l'Allemagne était en 2017 le 3^{ème} producteur mondial d'électricité éolienne avec 9,4 % du total mondial. Pour 2018, estime cette part à 8,8 %.

L'éolien couvrait 20,4 % de la consommation électrique Allemande en 2017-2018 (juillet-juin) ; ce taux atteignait 40,5 % au Danemark, 28,1 % en Irlande, 24,9 % au Portugal, 18,8 % en Espagne, 14,1 % au Royaume-Uni, 11,2 % en Suède et 5,7 % en France.

Selon EurObserv'ER, l'Allemagne est le 1^{er} producteur d'électricité éolienne d'Europe avec 111,6 TWh en 2018, soit 29,4 % de la production totale de l'Union européenne, devant le Royaume-Uni : 55,8 TWh, l'Espagne : 50,8 TWh et la France : 27,9 TWh. [44]

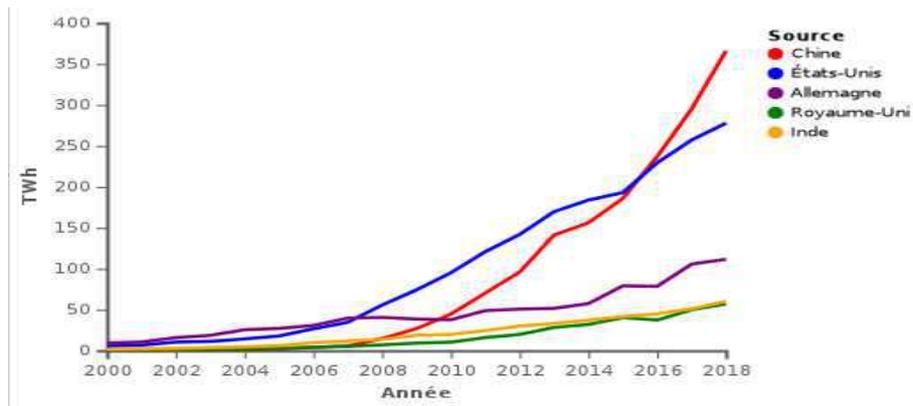


Figure (I-22) : Production d'électricité éolienne des cinq pays dirigeants (leaders).



Figure (I-23) : Parc éolien offshore en Allemagne 2018

La Chine a dominé le marché éolien. Pour la cinquième année consécutive, plus de 50 GW éoliens ont déjà été installés en 2018, selon un communiqué du Global Wind Energy Council (GWEC), l'association faitière mondiale de l'industrie. L'an dernier 51,3 GW éoliens ont été ajoutés.[45]

2018 la Chine est le pays à avoir installé le plus de capacité en éolien offshore que tout autre pays (1,8 GW), suivie du Royaume-Uni (1,3 GW) et de l'Allemagne (0,9 GW) d'après le chiffre du GWEC, l'association mondiale de l'industrie éolienne... Le pays compte également le plus grand espace maritime pouvant être équipé d'éoliennes en mer. D'ores et déjà leader mondial en termes d'éolien terrestre, Beijing entend bien ne pas rater ce nouveau marché que constitue l'éolien en mer. [46]



Figure (I-24) : Parc éolienne offshore dans la Chine

Le rapport annuel du GWEC sera publié dans son intégralité début avril, avec notamment le détail des fabricants mondiaux.

Les dix marchés porteurs de l'éolien terrestre en 2018 (capacité ajoutée dans l'année en MW) :

- Chine – 21 200 MW
- Etats-Unis – 7 588 MW
- Allemagne – 2 402 MW
- Inde – 2 191 MW
- Brésil – 1 939 MW
- France – 1 563 MW
- Mexique – 929 MW
- Suède – 717 MW
- Royaume-Uni – 589 MW
- Canada – 566 MW

Les cinq marchés porteurs de l'éolien en mer en 2018 (capacité ajoutée dans l'année):

- Chine – 1 800 MW
- Royaume-Uni – 1 312 MW
- Allemagne – 969 MW
- Belgique – 309 MW

➤ Danemark – 61 MW [45]

La plus grande éolienne offshore à ce jour est installée dans un parc « commercial » au Royaume-Uni. C'est la V164-8,8 MW de MHI Vestas. Le fabricant a annoncé le 1er avril 2019, que l'Ecosse accueillera dès 2020 pour le parc éolien flottant de Kincardine, 5 turbines MHI Vestas V164 de 9,5 MW. [46]



Figure (I-25) : La plus grande éolienne offshore au Royaume-Uni

Le 19 juillet 2019, le président kenyan a inauguré le plus grand parc éolien d'Afrique. Constitué de 365 éoliennes, il est en mesure de produire plus de 15 % des besoins en électricité du pays. Situé sur la rive est du lac Turkana, dans une zone semi-désertique, le Lake Turkana Wind Power se trouve idéalement placé dans un corridor naturel considéré comme l'un des endroits les plus venteux de la planète. [47]



Figure (I-26) : Projet de grand parc éolien d'Afrique-Kenya

I.5.4 Evolution d'énergie hydroélectricité dans le monde

L'année 2016, quatre pays se partagent plus de la moitié de la capacité installée mondiale de l'hydraulique : La Chine (28 %), les États-Unis (9 %), le Canada (9 %) et le Brésil (9 %). [48]

Par pays, TWh , 2016 Source international energy Agency (IEA)		
Chine	1193.37	28.62%
Canada	387.21	9.29%
Brésil	380.91	9.13%
Etats-Unis	292.11	7.00%
Russie	186.64	4.48%
Inde	137.53	3.30%
Norvège	144.01	3.45%
Japon	85.08	2.04%
Venezuela	67.63	1.62%
France	64.89	1.56%

Tableau (I-2) : Principaux pays producteurs d'électricité d'origine hydraulique en 2016

L'hydroélectricité est l'électricité produite par l'eau à travers les barrages. Sa production est pour l'essentiel consommée localement. Première source d'énergie renouvelable au monde, elle a fourni à elle seule plus de 16 % de l'électricité mondiale en 2017, constituant la troisième source de production électrique mondiale, derrière le charbon (40 %) et le gaz (19 %). Elle est aussi l'une des mieux réparties sur la planète. La Chine est de très loin le premier pays producteur mondial d'hydroélectricité : plus du quart du total mondial. Brésil, Canada et États-Unis sont les trois autres grands pays du secteur. La production est souvent

très variable d'une année à l'autre en fonction des conditions climatiques du pays. Dans les pays de l'OCDE, le potentiel de développement est déjà largement atteint. Dans les pays émergents, les contraintes environnementales et sociales (biodiversité, déplacement des populations) et le coût des investissements freinent le lancement de grands projets. [49]

L'évolution de la consommation mondiale d'hydroélectricité entre 2005 et 2018. On apprend qu'en 2017, plus de 910 millions de tonnes d'équivalent pétrole provenant de l'hydroélectricité ont été consommées dans le monde. [50]

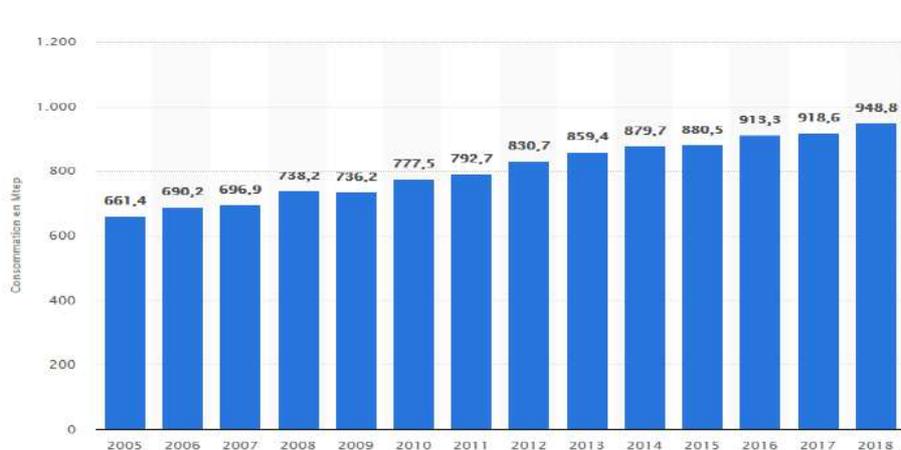


Figure (I-27) : La production mondiale d'hydroélectricité

Les plus gros producteurs d'hydroélectricité sont en 2017 la Chine (28,3 %), le Canada (9,4 %), le Brésil (8,8 %) et les États-Unis (7,7 %). Mais la place de cette énergie renouvelable dans la production nationale d'électricité est très variable, l'hydroélectricité au Brésil se situe en 2018 au 2^e rang mondial quant à la production avec 9,95 % de la production mondiale, derrière la Chine et devant le Canada, et au 2^{ème} rang quant à la puissance installée avec 8,1 % du total mondial, derrière la Chine et devant les États-Unis. Elle fournissait 65 % de la production d'électricité du pays en 2017 ; cette part dépassait 80 % à la fin des années 1990, mais a été fortement réduite par des sécheresses depuis le début des années 2000. Les cinq pays se démarquent avec des parts de 95,7 % en Norvège, 62,9 % au Brésil, 59,6 % au Canada, 44,8 % au Vietnam et 39,7 % en Suède.

🚧 L'hydroélectricité en Chine se situe en 2018 au 1^{er} rang mondial aussi bien en termes de puissance installée (27,3 % du total mondial) que de production (29,4 %). Elle fournissait 17,9 % de la production d'électricité du pays en 2017. La Chine est aussi au 1^{er} rang mondial pour la puissance de ses centrales de pompage-turbinage avec 18,7 % du total mondial.



Figure (I-28) : La centrale hydroélectrique de Wudongde en chine 2020

La centrale hydroélectrique de Wudongde, en cours de construction sur le fleuve Jinsha, possédera deux fois la capacité de production du barrage des Trois Gorges après son entrée en opération, prévue avant la fin de 2020, et deviendra ainsi la quatrième centrale hydroélectrique avec une capacité de plus de 10 millions de kw en Chine, et la septième du monde.

La centrale du barrage des Trois-Gorges est la plus puissante du monde, et sur les 30 barrages de plus de 3 000 MW en 2015, 13 étaient en Chine. Les objectifs du gouvernement sont de porter la capacité hydroélectrique à 510 GW en 2050 contre 352 GW fin 2018 et la capacité de pompage-turbinage à 150 GW .L'hydroélectricité aux États-Unis se situe en 2018 au 4^e rang mondial en termes de production avec 6,95 % de la production mondiale, derrière la Chine, le Brésil et le Canada. Sa puissance installée la situe au 3^e rang avec 7,95 % du total mondial en 2018, derrière la Chine et le Brésil. La puissance de ses centrales de pompage-turbinage se situe au 3^e rang avec 14,3 % du total mondial, derrière la Chine et le Japon. Elle a fourni 7 % de la production d'électricité du pays en 2018. Les États-Unis importent aussi de

l'hydroélectricité Canadienne : 1,6 % de la consommation d'électricité des États-Unis contre 30 GW. [51]

✚ En France le secteur de l'hydroélectricité bénéficie d'un potentiel important grâce à la présence des massifs montagneux (Alpes, Pyrénées, massif central) et est exploité en grande partie .En termes de capacité puissance installée, La France était fin 2018 au 2eme rang Européen avec 12% du total Européen après la Norvège et au 10eme rang mondial avec 2,0% au total mondial. La production hydroélectrique en France représentait 11,2% de la production totale en 2019 contre 12,5% en 2018 le taux de couverture de la consommation atteignait 13,7% en 2017 / 2018 et se classait durant la même année au 2eme rang Européen pour sa production hydroélectrique après la Norvège et avant la Suède avec plus de 10% de la production Européenne. [52]

✚ L'hydroélectricité au Canada avec une puissance installée de 81 386 MW (6,4% du total mondial) derrière la Chine (352 260 MW) , du Brésil (104 139 MW) et des Etats-Unis (102 745 MW) et se situe en terme de production en 2018 au 3^e rang mondial avec 9,1 % de la production mondiale, L'hydroélectricité a fourni 64 % de la production d'électricité du pays en 2017 et exporte aussi vers les États-Unis 16 % de la production canadienne en 2015 soit 1,6 % de la consommation d'électricité des États-Unis bien que les centrales de pompage-turbinage totalisent seulement 177 MW au Canada contre 22 855MW aux Etats-Unis et 29 990 MW en Chine. [53]

I.5.5 Evolution de l'énergie géothermique

2016, la production mondiale d'électricité à partir de la géothermie a représenté 81,7 TWh. La production d'électricité géothermique témoigne d'un regain de popularité en Europe. Il y a 62 centrales géothermiques en activité dont 48 situées dans les pays membres de l'UE, principalement en Italie, où sont implantées 35 centrales. 86 centrales sont actuellement en cours d'élaboration (un projet géothermique nécessite généralement 5 à 7 ans pour être opérationnel) et 98 sont en phase d'exploration.

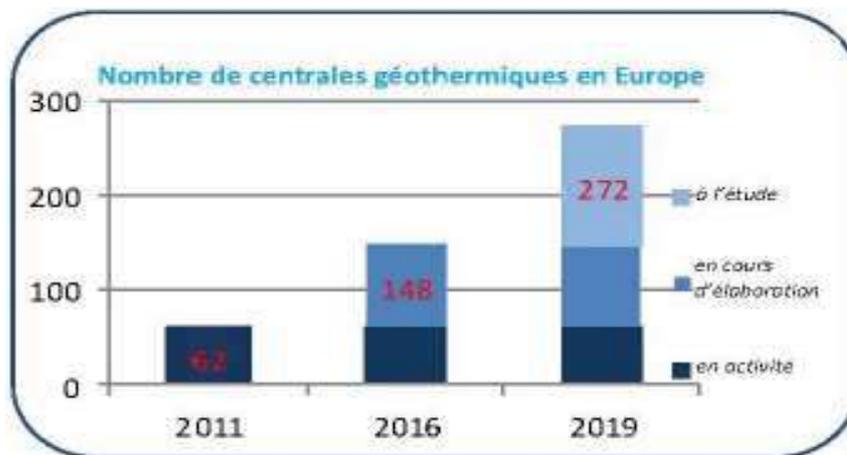


Figure (I-29) : Les centrales géothermiques en Europe

En considérant les centrales en cours d'élaboration, la puissance installée environ 3 GWe L'année 2016, tandis que les projets à l'étude apporteraient une puissance supplémentaire de 1 GWe, et une puissance de presque 4 GWe 2019.

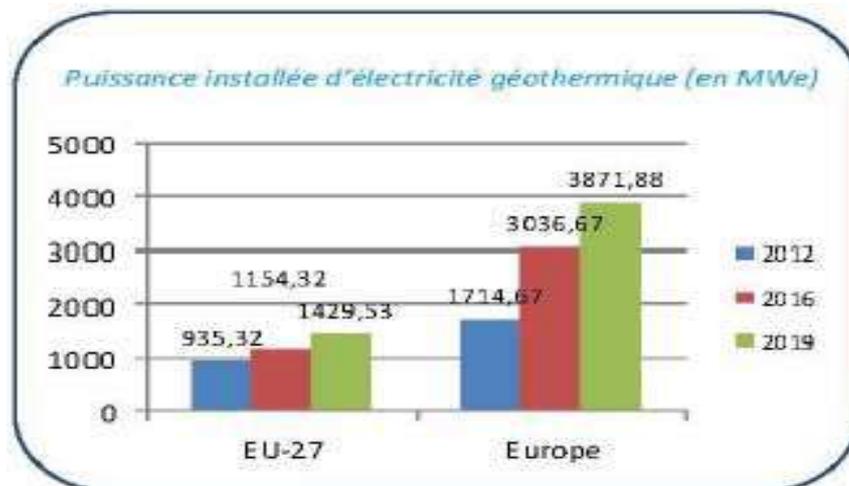


Figure (I-30) : Puissance installée de la géothermie

Trois types de centrale électrique géothermique sont en activité en Europe : centrale conventionnelle (hydrothermale), centrale à cycle binaire et centrale EGS (Enhanced Geothermal System : Système de géothermie stimulée). Si les centrales actuellement en activité sont majoritairement des centrales conventionnelles, l'avancée constante des autres techniques ainsi que la flexibilité géographique du système EGS permettront une progression des deux autres types de centrales. Par exemple, les centrales EGS, qui sont au nombre de 3 actuellement, seront sans doute 49 d'ici 2020.

Le projet géothermie a réalisé une carte de l'Europe représentant la situation des ressources géothermales exploitables en 2020, 2030 et 2050. La carte a été élaborée à partir d'un protocole spécifique d'estimation de la ressource géothermale. Cette estimation des ressources géothermales pour la production d'électricité est le fruit de la synthèse de données existantes, fournies par les 28 pays de l'UE, et d'une nouvelle approche méthodologique s'inspirant de l'expérience du Canada, de l'Australie et des États-Unis. [54]

Le projet de développement géothermique de Menengai, qui devrait produire jusqu'à 465 mégawatts (MW) une fois achevé, se situe à environ 180 kilomètres au nord-ouest de Nairobi, la capitale. Financé par la Banque africaine de développement (BAD) et différents partenariats public – privé impliquant la compagnie nationale Geothermal Development Company (GDC), il vise à répondre à la demande en énergie du Kenya, pays d'Afrique de l'Est peuplé de 50 millions d'habitants dont la croissance économique augmente de 5 à 6 % chaque année.

La moitié de la consommation kényane d'électricité est aujourd'hui assurée par les champs géothermiques et l'objectif est de couvrir 100 % des besoins en 2022. [55]

I.5.6 Evolution de l'énergie de la biomasse

En 2016, la production d'électricité à partir des bioénergies renouvelables représente 504 TWh soit 2 % de la production mondiale d'électricité. La puissance installée mondiale en matière de solaire photovoltaïque s'élève en 2016 à 303 GW. Les trois plus grands producteurs d'électricité à partir des bioénergies dans le monde sont les États-Unis (79,1 Twh), la Chine (76,1 Twh) et l'Allemagne (58,3 Twh). [56]

La filière bioénergies électriques atteint une puissance installée de 2026 MW avec 74 MW de nouvelles capacités, dont 16 MW raccordés sur le dernier trimestre 2018. Sa production s'est élevée à 7,5 TWh sur l'année 2018 (9,7 TWh en incluant la part non renouvelable), en hausse de 3,2% par rapport à 2017. La filière couvre ainsi 1,6% de l'électricité consommée en 2018.

Afin de répondre aux objectifs de la transition énergétique de porter à 40% la part des énergies renouvelables dans le mix électrique en 2030, les réseaux de transport et de distribution continuent d'évoluer pour permettre l'intégration de la production d'électricité renouvelables, tout en garantissant la sécurité et la sûreté du système électrique, ainsi que la qualité d'alimentation des consommateurs. [57]

Au Canada, les biocarburants liquides sont des carburants améliorés dérivés de la biomasse pouvant se présenter sous une forme liquide comme l'éthanol ou les diesels renouvelables. Les biocarburants liquides sont mélangés à de l'essence et à du diesel classique et permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre associées aux mélanges de carburants.

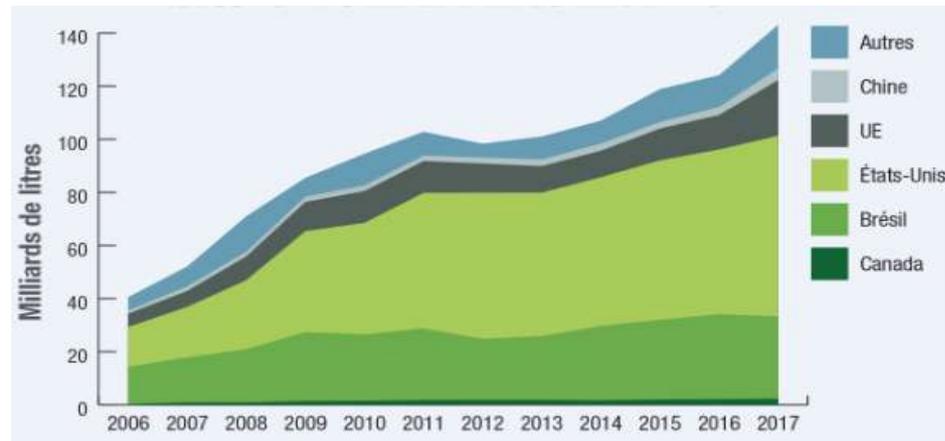


Figure (I-31) : Production mondiale de biocarburants

En 2017, il y avait 36 unités de cogénération opérationnelles dans des usines de pâtes et papiers et 41 fournisseurs indépendants d'énergie (FIE) utilisant de la biomasse. La capacité électrique de la cogénération dans les usines de pâtes et papiers était de 3 427 MW, tandis que la capacité calorifique était de 1 384 MW. La capacité des FIE pour l'électricité et le chauffage était de 794 MW et 400 MW respectivement. Il existe également 364 projets de biothermie, dont 70% ont une capacité de moins de 1 MW. Les établissements, incluant les écoles et les hôpitaux, constituent le marché le plus stable pour la biothermie au Canada. [58]

En France, les bioénergies se divisent en quatre catégories : Les déchets ménagers, les déchets de papèterie, le biogaz et le bois-énergie et autres composants solides. [56]

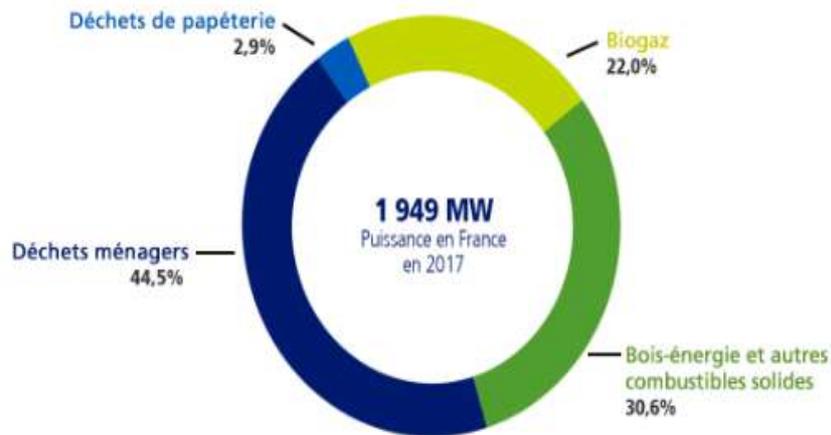


Figure (I-32) : Répartition de la bioénergie en France 2017.

I.6 Le renouvelable minoritaire dans les autres secteurs énergivores

La croissance des énergies renouvelables dans le secteur des transports ne sera pas aussi spectaculaire que dans le secteur de la production d'électricité : la part du renouvelable atteindra 5% en 2022 (contre 4% aujourd'hui). Même son de cloche dans le secteur de la production de chaleur : les énergies renouvelables ne pèseront que pour 11% en 2022, contre 9% en 2016. L'Union Européenne devrait rester le plus gros consommateur de chaleur renouvelable, à hauteur de 22% en 2022. [38]

I.7 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre que l'énergie renouvelable est de plus en plus très répandue dans la production mondiale de l'électricité,

Le renforcement du système de production électrique se fait par l'insertion de nouvelles unités de production au réseau de transport.

Dans le prochain chapitre, nous allons voir que L'Algérie, de part sa situation géographique, bénéficie de conditions favorables pour l'utilisation des énergies renouvelables. L'Algérie est parmi les pays avantageux qui puissent utiliser l'énergie renouvelables comme solution de future pour remplacer l'énergie fossile.

Chapitre II

II.1 Introduction

Les énergies renouvelables (énergie éolienne, énergie solaire, biomasse...) représentent la solution la plus intéressante pour relever les défis énergétiques mondiaux. Elles sont propres et n'ont besoin d'aucun combustible. En outre, l'éolien et le solaire constituent des ressources indigènes dont les potentiels sont suffisants pour faire face à la demande d'énergie en augmentation incessante. Par ailleurs, la production de l'énergie éolienne devient de plus en plus compétitive par rapport à l'énergie solaire et aux combustibles fossiles traditionnels et se situe déjà aujourd'hui à égalité avec les nouvelles centrales à charbon ou à gaz. [11]

L'Algérie se classe parmi les pays du monde, disposant d'un potentiel en énergie renouvelable assez conséquent. Comme le pays bénéficie d'une bonne géographie. L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement Algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l'Algérie s'engage dans une nouvelle énergétique durable. [59]

L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile. [60]

Notre pays l'Algérie possède un potentiel immense en énergie renouvelable estimé à 2 634 960 TWh/an qui correspond à 107 fois la consommation mondiale estimée autour de 24 800 TWh/an en 2017 qui lui permet de diversifier ses sources énergétiques. L'introduction des énergies renouvelables en Algérie à l'exemple de la ferme éolienne de 10 MW à Kabertene (wilaya d'Adrar) ou des centrales photovoltaïques est devenue une recommandation des pouvoirs publics et une donnée incontournable. L'Algérie est confrontée actuellement à une obligation stratégique de la diversification de ses sources d'énergie, non seulement en termes de moyens financiers dont l'objectif n'est pas uniquement d'économiser ses réserves énergétiques, mais aussi de bénéficier le plus rapidement du transfert technologique. Notre pays ambitionne d'atteindre un taux d'intégration de 6 % de la production de l'énergie électrique à travers l'utilisation de l'énergie solaire et l'énergie éolienne et prévoit de porter ce chiffre à 10 % en 2027. [11]

II.2 Généralités sur la situation énergétique en Algérie

Avant d'analyser ce point, il est très important de noter que s'il est un pays vulnérable à la volatilité des marchés (prix) des hydrocarbures c'est bien l'Algérie parce que hyper dépendante de la rente pétrolière soit 98% des exportations de l'Algérie sont à l'origine des hydrocarbures. Par contre, importe environ 70% à 75% des autres besoins de ménage et des entreprises publiques et privées.

L'Algérie est un pays qui dispose d'une réserve énergétique très important au niveau mondial, mais le problème énergétique en Algérie est un problème qui se pose en terme de stratégie de valorisation de ses ressources pour les besoins de développement du pays, de choix d'une véritable politique énergétique à long terme et de définition immédiate d'un modèle cohérent de la consommation énergétique avant l'épuisement de ces sources fossiles.

A ce stade la loi Algérienne sur la maîtrise de l'énergie et les nouveaux textes règlementaire mis en place récemment venus fixer et définir le cadre général des différentes actions afin de promouvoir une rationalisation de l'emploi des énergies disponibles.

A ce titre, le représentant de Clarke Energy Algeria MICHAUT Stéphane a montré qu'à besoins énergétiques égaux, la cogénération permettait de réaliser 40% d'économie d'énergie primaire et de réduire de 50% les émissions d'un client industriel. Notant que l'Algérie s'oriente vers des moyens de production alternatifs, le solaire en première place puis l'éolien. Elle doit au même temps préserver les ressources actuelles en gaz naturel et rationaliser son utilisation. [4]

La chute libre des cours du baril de pétrole de plus de 50 % dans la production mondiale depuis 2014 a suscité des interrogations quant à ses répercussions sur la transition énergétique et plus particulièrement sur le déploiement du renouvelable dans le monde. A cette chute des prix de pétrole de 2014 s'est ajoutée une autre chute drastique des prix du pétrole due à l'épidémie de coronavirus, mettant à mal l'économie mondiale et particulièrement Algérienne ; face à cet impact du COVID 19 comparable à une catastrophe naturelle et même une guerre planétaire , l'économie mondiale connaît un choc de l'offre et de la demande entraînant une récession économique mondiale. Mais cette épidémie est-elle la cause réelle de la crise en Algérie. La propagation de l'épidémie de coronavirus, poursuit-il, a impacté "sévèrement" les prix, au cours des deux derniers mois, en passant aux alentours de moins 50

dollars le baril voir même 40 dollars contre plus de 65 dollars en début d'année, soit une baisse de plus de 25 dollars par baril.

Avec un prix du baril à environ moins de 50 dollars, le gouvernement Algérien, qui a élaboré la loi de finances 2020 sur un prix référence de 60 dollars, se trouverait dans une situation délicate en raison de la crise financière qui pourrait s'accroître cette année.

La situation se corse de plus en plus pour l'économie Algérienne en raison de la chute du prix du pétrole causée par la pandémie du coronavirus et sa propagation dans le monde. Et les prévisions le prix révisé de 60 dollars le baril de la loi de finance 2020 est devenu obsolète pour l'année en cours. Or le prix du pétrole oscillait entre 25 et 35 dollars entre avril et mai 2020 du au confinement dans le monde, aggravant ainsi le déficit budgétaire du pays. C'est dans ce contexte que le ministre Algérien de l'Énergie Mohamed Arkab, qui a présidé les 5 et 6 mars à Vienne la réunion de l'OPEP et des pays non-OPEP, a appelé à entreprendre une action consensuelle et rapide pour faire face à la détérioration «inquiétante» des marchés pétroliers (APS) ; une action qui s'est soldée par la réduction de 10M de barils p/j et ceci repose sur l'hypothèse que la demande mondiale a chuté seulement de 10% alors que la pandémie du COVID 19 a provoqué une chute drastique de la demande mondiale de 33% (environ 30M de barils). Et même dans ce cas (réduction de 10M de barils/j) l'Algérie est loin d'être tirée d'affaire à cause du COVID 19 ; d'ailleurs dans l'avant projet de la loi de finance complémentaire le gouvernement Algérien a fixé le prix moyen de table de référence à 35 dollars le baril au lieu donc de celui de 60 dollars anticipé par la LFC initiale (LF 2020). [61]

L'Algérie alerte sur la situation «extrêmement grave» du marché pétrolier et s'inquiète pour son budget. En effet, qu'elle était la situation de l'économie mondiale, notamment chinoise, avant décembre 2019, au moment de l'apparition de l'épidémie du coronavirus dans la ville de Wuhan en Chine, premier pays consommateur d'hydrocarbures dans le monde. [62]

- **L Émissions de gaz à effet de serre**

Le secteur de l'Énergie est responsable à plus des deux-tiers des émissions de gaz à effet de serre (66,92%).

Le potentiel du pays en hydrocarbures explique en grande partie cette situation, car l'Algérie est un grand exportateur d'hydrocarbures. Il faut rappeler aussi le fait que l'Algérie a mis en œuvre, dès le début des années 80, une stratégie de développement basée sur les ressources

énergétiques disponibles et, principalement, le gaz naturel qui est utilisé dans différents domaines d'activités (centrales électriques, secteur industriel et résidentiel, etc.). Le Changement d'affectation des terres et la foresterie est le second secteur important du point de vue des émissions (12,44%).

L'Agriculture est le troisième secteur émetteur de gaz à effet de serre avec plus de 11,49% du total. Le secteur des Déchets intervient pour 4,59% et celui des procédés industriels pour 4,52%.

Les défis actuels et futurs de l'Algérie, tels que la forte croissance de la population, l'urbanisation rapide, le développement accéléré et la hausse de la demande énergétique, pourraient s'intensifier en sachant que la population Algérienne augmente de 1,5 à 3% par an de sorte que nous doublons notre population tous les 40 ans. La consommation d'énergie au niveau national augmente année après année en raison du développement démographique et urbain, en plus du développement économique en constante progression. [2]

La conjoncture économique, le réchauffement climatique et la question de l'indépendance énergétique rendent incontournables les acteurs des énergies renouvelables en Algérie. La croissance impressionnante du marché mondial des énergies éolienne, solaire ou tirée de la biomasse et le développement de ces secteurs en Algérie offre des alternatives sûres de développement durable pour le pays. La recherche et le développement s'en trouvent également stimulés.

L'Algérie dispose d'un important capital inépuisable en énergies renouvelables, qui est en mesure d'être exploité facilement et proprement. L'intégration à long terme des énergies renouvelables dans d'offre énergétique du pays joue un rôle important dans l'économie d'énergie et l'efficacité énergétique. Ce dernier permet, à travers une bonne maîtrise du rythme de croissance de la demande, une meilleure planification des investissements nécessaires à la satisfaction des besoins énergétique. [12]

II.3 Les énergies renouvelables comme solution

Le secteur des énergies fossiles constitue 98% des ressources à l'exportation en Algérie, ce qui est considéré comme un document de sensibilisation et d'alerte pour le conseil nationale de l'énergie donc, c'est le moment de lancer des nouvelles politiques énergétiques en Algérie.

Le recours à l'autre source d'énergie, y compris les énergies renouvelable, est cerné dans le concept de la transition énergétique. La transition énergétique peut se définir comme le passage d'une civilisation humaine construite sur une énergie essentiellement fossile, polluante, rare chère a une civilisation ou l'énergie est renouvelable abondante et moins polluante ayant pour objectif le remplacement à terme des énergies de stock (pétrole, charbon, gaz) par les énergies des flux (éolien, solaire, biomasse). [4]

L'Algérie s'est engagée sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile à travers le lancement d'un programme ambitieux pour le développement des énergies renouvelables qui a été adopté par le Gouvernement en février 2011, révisée en mai 2015 et placé au rang de priorité nationale en février 2016. [60] Aujourd'hui, l'économie Algérienne est totalement dépendante du secteur des hydrocarbures, et dans le contexte de conjoncture économique actuel, il devient impératif et urgent d'emprunter une nouvelle trajectoire, en développant des énergies alternatives surtout dans une optique de raréfaction des ressources, de réchauffement climatique, et de développement durable. Dans ce contexte, l'Algérie dispose d'un important potentiel en énergies renouvelables, notamment le solaire et l'éolien. Même si elles se placent au cœur des politiques énergétique et économique menées par le pays, la majeure partie de ce potentiel énergétique, reste non ou peu exploité. Aussi, l'intégration à long terme des énergies renouvelables dans d'offre énergétique du pays joue un rôle important dans l'économie d'énergie et l'efficacité énergétique. [12]

II.4 Programme national et efficacité énergétique

Le programme des énergies renouvelables dans sa version actualisée, consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent.

Ce programme consiste a installer une puissance d'origine renouvelable près de 22 000MW entre 2011 et 2030 dont 12 000 MW seront dédiés a couvrir la demande nationale en électricité et 10 000 MW à l'exportation.

L'exportation de l'électricité est toutefois conditionnée par l'existence d'une garantie d'achat à long terme, de partenaires fiables et de financement extérieur.

A la faveur de ce programme les énergies renouvelables se placent au cœur des politiques énergétiques et économiques menées par l'Algérie : d'ici 2030, environ 40% de la production d'électricité destinée à la consommation nationale sera d'origine renouvelable.

En effet, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir du solaire photovoltaïque, du solaire thermique et éolien qui seront le moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de la croissance. [4]

- **Programme des énergies renouvelables**

L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelable afin d'apporter des solutions globales et durable aux défis environnementaux et aux problématique de préservation des ressources énergétique ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire et cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle qui devrait atteindre 37% de la production nationale d'électricité malgré un potentiel assez faible le programme n'exclut par l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part avoisiner les 3 de la production d'électricité en 2030.

L'Algérie prévoit également l'installation de quelques unités de taille expérimentale afin de tester les différentes technologies en matière de biomasse de géothermie et de dessalement des eaux saumâtres par les différentes filières renouvelables.

Le programme des énergies renouvelables est défini ainsi pour les différentes phases :

- Une puissance totale de près de 650 MW installée en 2015.
- D'ici fin 2020 il est attendu l'installation d'une puissance totale d'environ 2600 MW pour le marché nationale et une possibilité d'exportation allant jusqu' à 10 000 MW. [4]

- **Consistance du programme de développement des énergies renouvelables**

La consistance du programme en énergie renouvelables à réaliser pour le marché national sur la période 2015-2030 est de 22 000 MW, répartie par filière. [60]

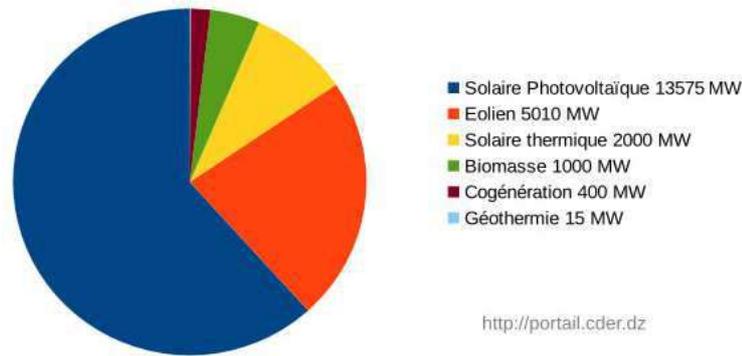


Figure (II-1) : Objectifs du programme Algérien des énergies renouvelables 22GW à l'horizon 2030

- **Programme d'efficacité énergétique**

Le programme d'efficacité énergétique obéit à la volonté de l'Algérie de favoriser une utilisation plus responsable de l'énergie et d'explorer toutes les voies pour préserver les ressources et systématiser la consommation utile et optimale.

L'objectif de l'efficacité énergétique consiste à produire les mêmes biens ou services, mais en utilisant le moins d'énergie possible. Ce programme comporte des actions qui privilégient le recours aux formes d'énergie les mieux adaptées aux différents usages et nécessitant la modification des comportements et l'amélioration des équipements. [59]

II.5 Programme national de développement des énergies renouvelables

A travers ce programme d'énergies renouvelables, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir des filières photovoltaïque et éolienne en intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie et au-delà de 2021, le solaire thermique. Ces filières énergétiques seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance économique.

37 % de la capacité installée d'ici 2030 et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable.

Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois.

Cela n'exclut pas pour autant le lancement de nombreux projets de réalisation de fermes éoliennes et la mise en œuvre de projets expérimentaux en biomasse, en géothermie et en cogénération.

Les projets EnR de production de l'électricité dédiés au marché national seront menés en deux étapes:

- **Première phase 2015 - 2020** : Cette phase verra la réalisation d'une puissance de 4010 MW, entre photovoltaïque et éolien, ainsi que 515 MW, entre biomasse, cogénération et géothermie.
- **Deuxième phase 2021 - 2030** : Le développement de l'interconnexion électrique entre le Nord et le Sahara (Adrar), permettra l'installation de grandes centrales d'énergies renouvelables dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoune et Bechar et leur intégration dans le système énergétique national. A cette échéance, le solaire thermique pourrait être économiquement viable.

La stratégie de l'Algérie en la matière vise à développer une véritable industrie des énergies renouvelables associée à un programme de formation et de capitalisation des connaissances, qui permettra à terme, d'employer le génie local Algérien, notamment en matière d'engineering et de management de projets. Le programme EnR, pour les besoins d'électricité du marché national, permettra la création de plusieurs milliers d'emplois directs et indirects. [59]

II.6 Perspectives des énergies renouvelables en Algérie

De part sa situation géographique, l'Algérie ne peut que favoriser le développement de l'utilisation des énergies solaire et éolienne. Ainsi, en Algérie, l'enjeu du développement des énergies renouvelables ne peut être qu'important. En effet, ces énergies permettront de couvrir la demande, de plus en plus croissante, des besoins énergétiques de base nécessaires pour le développement socio-économique du pays. En février 2015, le gouvernement Algérien a adopté son programme de développement des énergies renouvelables pour la période 2015-2030. La première phase du programme a démarré en 2011 et a permis la réalisation d'études sur le potentiel national et la création de projets pilotes, ce programme a pour objectifs la réalisation à base de ressources d'énergie renouvelable, plus de 4,5 GW d'ici à 2020 et 22 GW à l'horizon 2030, dont :

- 13 575 MWc de solaire photovoltaïque,

- 5 010 MW d'éolien,
- 2 000 MW de solaire thermodynamique (CSP),
- 1 000 MW de biomasse (valorisation des déchets),
- 400 MW de cogénération,
- 15 MW de géothermie. [13]

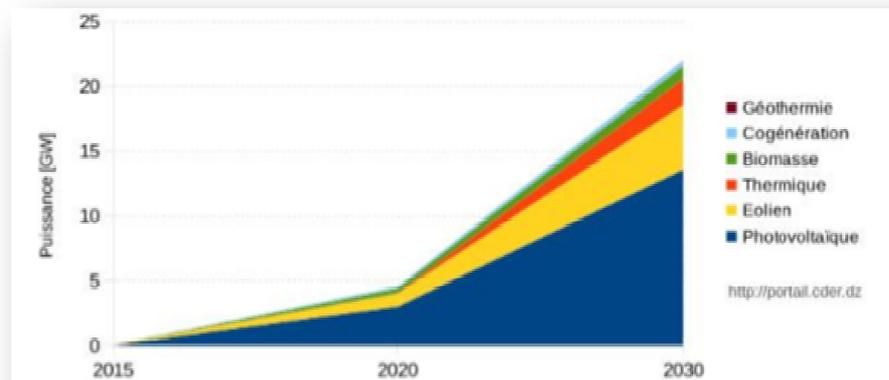


Figure (II-2) : Les perspectives du programme national des énergies renouvelables Algérien 2015-2030

II.7 Potentiel des énergies renouvelables en Algérie

Face à la double contrainte de la raréfaction des énergies fossiles et du réchauffement climatique, les énergies renouvelables représentent une alternative nouvelle et un avenir sûr pour la sécurité énergétique en Algérie. [12]

L'Algérie s'engage sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile. Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre à moyen terme une part appréciable de la production nationale d'électricité. Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030. L'Algérie prévoit également l'installation de quelques unités de taille expérimentale afin de tester les différentes technologies en matière de biomasse, de géothermie et de dessalement des eaux saumâtres par les différentes filières d'énergie renouvelable avec un potentiel de chercheurs dans des domaines liés de très près à cette problématique. [63]

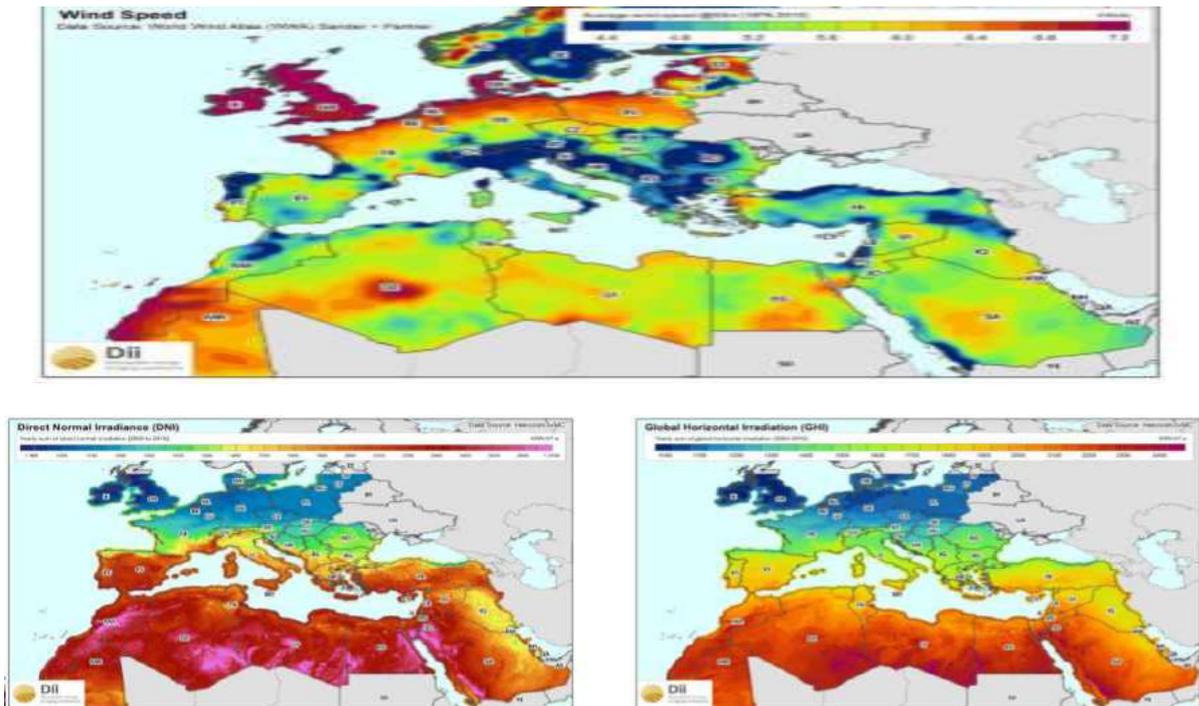


Figure (II-3) : L'Algérie dispose d'un des potentiels Solaire et éolien les plus élevés en Afrique du Nord

II.7.1 L'énergie solaire photovoltaïque

L'Algérie reçoit annuellement sur l'ensemble de son territoire une énergie solaire des plus importantes du monde. Elle s'élève environ 5,2 millions de milliards de K/W/h/an, soit l'équivalent de : 430 fois les réserves Algériennes prouvées en hydrocarbures et 4,8 fois les réserves mondiales prouvées en pétrole.

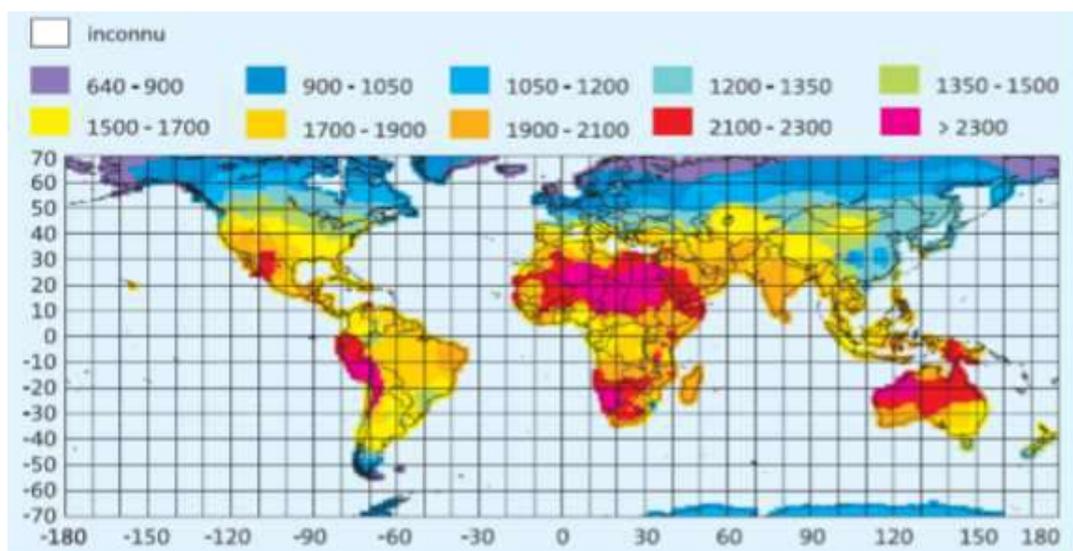


Figure (II-4) : Potentiel solaire Algérienne dans le monde en 2015

Le solaire est le potentiel le plus important en énergies renouvelables en Algérie. Il représente 169,44 Twh/an , soit 5000 fois la consommation Algérienne en électricité. Ainsi, avec plus de 2 000 heures d'insolation par an et jusqu' 3 900 heures sur les hauts plateaux et au Sahara, l'énergie solaire reçue quotidiennement sur le territoire Algérien est de l'ordre de 1 700 KWh/m²/an au Nord et 2 263 KWh/m²/an au Sud. Soit une moyenne de plus de 2 200 KWh/m²/an. [12]

Paramètres	2015	2016	2017
Puissance installée conventionnelle	662	674,63	780,43
Puissance installée EnR	94,3	229,3	354,3
Total puissance installée(MW)	692,79	923,93	1134,73
Production d'énergie conventionnelle	764,82	825,12	1032,24
Production d'énergie EnR	34,8	224,05	523,73
Total production d'énergie (GWh)	799,63	1049,13	1555,97
Consommation combustible(Mth)	2436,27	2660,09	3421,76
Disponibilité totale(%)	88,63	88,17	89,4
Quantités de combustibles économisées grâce à l'exploitation des centrales EnR	265620894		
	26138 (Gaz en m³)		
Quantités de CO₂ évitées grâce à l'exploitation des centrales EnR (entonne)	602081,25 (Gasoil en m³)		

Tableau (II-1): Evolution des paramètres énergétiques (2015-2017)

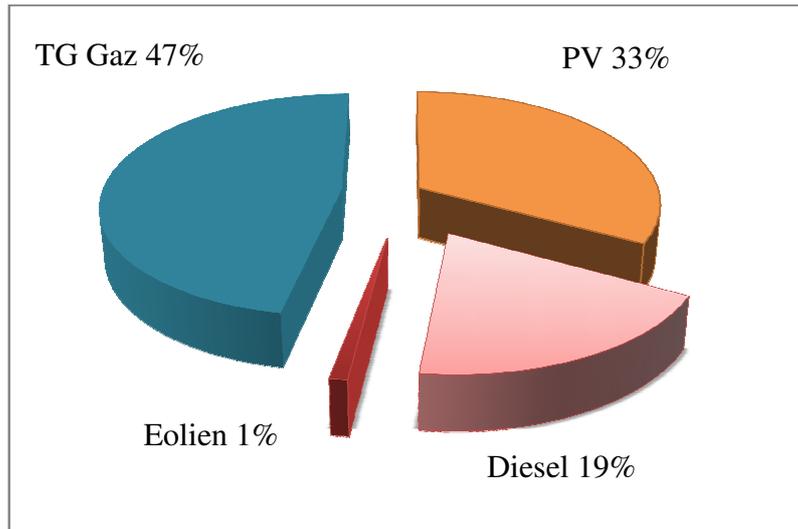


Figure (II-5) : Production d'électricité par filières

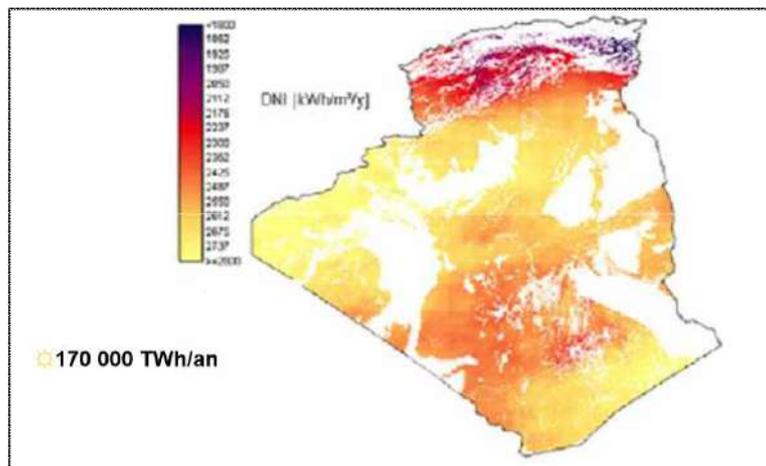


Figure (II-6) : Potentiel solaire en Algérie

- **Les centrales solaires photovoltaïques en Algérie :**

Centrale de Sidi Belabbes, Saida (centrale de Skhouna), centrale de Naama , Batna, Souk Ahras , Djelfa, El bayedh, Laghouat, M'sila, Ghardaia, Hedjira, Tindouf, Timimoun, Adrar, Kabertene, In Salah, Zaouiet Kounta, Aoulef, Reggane, Djanet, Tamanrasset. [64]

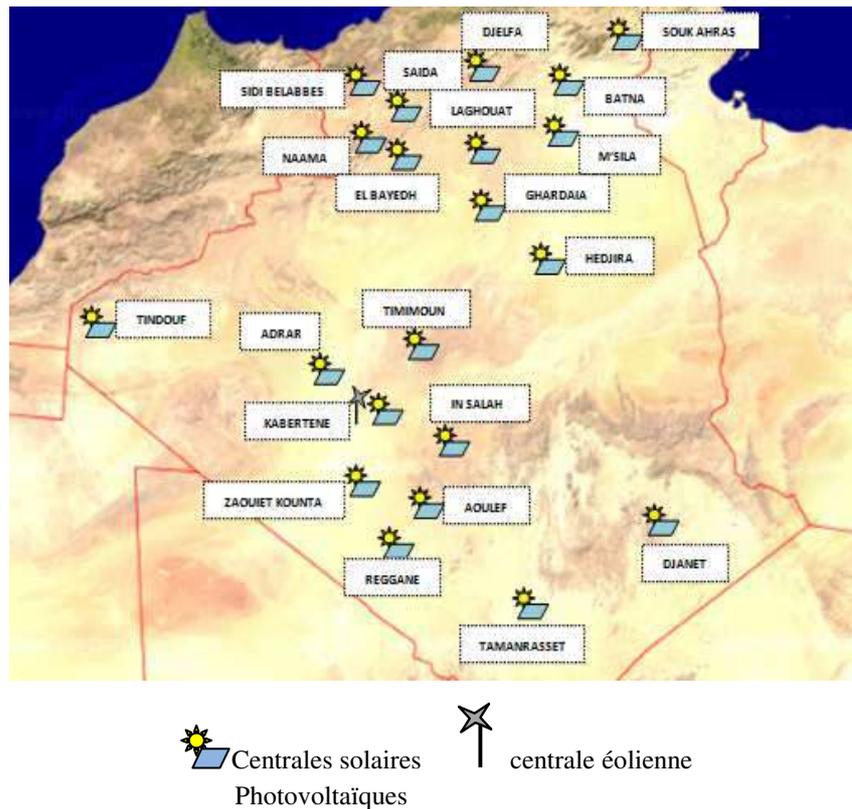


Figure (II-7): Les centrales solaires photovoltaïques et éolienne en Algérie

Sur l'ensemble des 200 mégawatts, 50 ont été réservés au groupe Sonelgaz dans le cadre d'un programme dédié aux centrales à « fuel » dans le sud, permettant de réduire de 50% les coûts de son transport du nord vers le sud du pays.

Cette opération s'inscrit pour la production de 22 000 mégawatt et dont un programme de 400 mégawatt actuellement en réalisation à travers 24 wilayas relayées au réseau de Sonelgaz, outre 10 mégawatt en énergie éolienne mises à l'essai à la région de Kabertene (Adrar). [65]

L'Algérie produit 20 000 mégawatts d'électricité par an, pour une consommation nationale estimée à 15 680 mégawatts. Les autorités ont, depuis l'année 2015, lancé un vaste programme visant la production de 22 000 mégawatts d'énergie renouvelable d'ici 2030. Le potentiel du pays dans ce domaine est à la hauteur du taux d'ensoleillement qui est de 2 800 à 3 500 heures par an. [64]

La Compagnie nationale des hydrocarbures Sonatrach travaille avec le groupe Italien ENI sur un projet de production de 350 MW en énergie solaire qui sera concrétisé en 2020, le PDG de

Sonatrach, lors d'une conférence de presse, tenue en marge de la rencontre «Algeria Future Energy» organisée au Centre International des Conférences (CIC) d'Alger.

Ce projet fait partie, selon du plan de développement de son entreprise qui table sur la production de 1.6 GW d'énergie solaire pour l'alimentation des installations de Sonatrach, qui permettra de préserver 20% de gaz utilisées dans le fonctionnement des installations de la compagnie.

Cette implication de Sonatrach dans le développement du solaire, est un axe stratégique et important pour la compagnie nationale, qui compte rediriger la quantité d'énergie produite dans ses usines vers l'exportation.

L'italien ENI est impliqué dans plusieurs réalisations notamment d'une centrale photovoltaïque d'une capacité de 10 MW au niveau du champ de BRN (Bir Rebaa nord), dans la région d'Ouargla.

Le groupe Italien table sur plusieurs projets dans le renouvelable en Algérie, afin d'arriver à une capacité de 500 MW. [66]

Il est noté que Sonatrach et son partenaire historique ENI ont entamé depuis 2016 des discussions pour la concrétisation d'une multitude d'initiatives à développer dans le futur, dans différents domaines énergétiques.

Le géant Italien qui concentre depuis quelques années ses investissements dans la recherche de solutions technologiques dans les énergies renouvelables, compte investir plusieurs milliards d'euros en Algérie dans les quatre ans à venir, selon les dernières déclarations du patron d'ENI. [67]



Figure (II-8) : Sonatrach acquiert sa première centrale photovoltaïque dans Ouargla 2018



Figure (II-9): Projet de 350MW d'énergie solaire de L'Italien ENI en Algérie.

- **Projet des centrales électriques solaires (8 entreprises soumissionnent à l'appel d'offres techniques)**

Le président de la commission de régulation de l'électricité et du gaz (CREG), Abdelkader Choual, a indiqué que le projet s'adresse aux investisseurs locaux, qu'ils soient seuls ou en partenariat en vue de la réalisation de plusieurs projets de centrales électriques solaires photovoltaïques d'une capacité globale de 150 MWc (mégawatt-crête).

Le projet concerne quatre wilayas Ghardaïa, Biskra, Ouargla et El Oued. Pour cette dernière, il n'y a eu aucun soumissionnaire, a-t-on observé sur place. [68]

Par ailleurs, une capacité totale de 343 MW est fournie par une vingtaine de centrales solaires photovoltaïques, réalisées entre 2014 et 2017 dans le Sud et les Hauts-Plateaux, ainsi qu'une centrale pilote multi-technologies de 1,1 MW déployée en 2014 à Ghardaïa, d'une ferme éolienne de 10,2 MW installée à Kabertène (Adrar) en 2014, réalisées par SKTM/Sonelgaz, et une centrale solaire photovoltaïque de 10 MW mise en service en 2018 à Ouargla par Sonatrach. [14]



Figure (II-10): Projet de 150 MW en énergie solaire à travers les wilayas (Biskra- El oued- Ouergla- Ghardaia) 2015



Figure (II-11) : Centrale solaire photovoltaïque de Kabertène (03MWc) 2015



Figure (II-12) : Centrale solaire photovoltaïque d'Adrar (20MWc) 2015



**Figure (II-13) : Centrale solaire photovoltaïque de Timimoun (09MWc)
2016**

Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida (SKTM) développe actuellement un ensemble de projets dans le nord-Ouest de l'Algérie, appelé « Lot 4- Région Hauts Plateaux Ouest ». Ce projet est composé de quatre installations PV, respectivement construites dans les régions de Naâma, El Bayadh, Saïda et Sidi Bel Abbès. Les installations PV disposent d'une capacité utile de puissance respectivement 16 MVA, 19,2 MVA, 24 MVA et 9,6 MVA. Belectric est le sous-traitant EPC principal et est donc responsable du développement de tous les projets pendant l'ensemble de la phase de mise en œuvre. Le présent rapport se charge exclusivement de l'analyse de l'installation PV Saida et de son raccordement au jeu de barres 60 kV d'Ain Skhouana.

L'installation PV Saida sera raccordée au réseau de la Société Algérienne de Gestion du Réseau de Transport de l'Electricité (GRTE) au niveau de la sous-station d'Ain Skhouana, sur le jeu de barres 60 kV. La tension de fonctionnement de la centrale photovoltaïque de Saida est de 30kV, une sous-station est donc nécessaire afin d'élever la tension au niveau de tension du poste 60kV.

L'installation PV Saida est composée de quinze supports fixes photovoltaïques à double onduleur 2x800 kVA, raccordés à une station de collecte par le biais de câbles souterrains. Le réseau électrique AC dispose d'une configuration avec deux boucles de 7 et 8 supports d'onduleurs chacune, chacun des supports étant composé de deux modules d'onduleurs parallèles SMA SC800CP XT. Chacune des boucles recueille la puissance

de 7 ou 8 transformateurs 1800 kVA 30/0,360 kV via 7 ou 8 unités RMU dans la station de collecte de l'installation PV.

L'installation PV Saida est raccordée à la sous-station d'Ain Skhouna, sur le jeu de barres 60 kV.

D'autre part, en cas de contingence ou de coupure soudaine, l'installation PV ne présente pas de menace pour la sous-station dans la mesure où les tensions sont dans la plage de tolérance admissible dans des conditions de fonctionnement normales, ainsi que pour le cas de faible charge. Suivant la recommandation de l'analyse des contingences, le fonctionnement de l'installation PV avec un contrôle en tension est conseillé pour soutenir activement le réseau.

En outre, le type d'onduleur mis en œuvre soutient le réseau en cas de défaut. Il convient donc de déterminer sa participation au courant de court-circuit.

Dans le cas d'une perte soudaine de la centrale PV en cas de charge maximum, le niveau de tension au poste reste dans la plage de fonctionnement normale. Si la contingence se produit en cas de charge minimum, la perte de la centrale PV complète n'affecte pas la tension au poste, alors que la fréquence oscille dans la plage requise pour les cas exceptionnels. [64]



Figure (II-14) : Centrale solaire photovoltaïque de Saida-Ain Skhouna (30 MWc) 2016

II.7.2 L'énergie solaire thermique

Le groupe public Algérien Sonelgaz a annoncé que la société ouvrirait sa première centrale solaire thermique en 2016, à El Oued, à 620 km au Sud-Est d'Alger.

L'Algérie bénéficie d'atouts énergétiques importants qu'elle entend valoriser.

en 2016, sa première centrale solaire thermique, Le groupe public Sonelgaz implantera à El Oued (près de la frontière tunisienne) une station d'une capacité de 150 MW. [69]

L'énergie solaire thermique est présente dans ce programme national des énergies renouvelables dans les domaines de la concentration solaire et l'efficacité énergétique. La concentration solaire représente à elle seule deux tiers (2/3) de la puissance à installer. En 2030, pour les centrales à concentration solaires, la capacité cumulée à installer prévue est de 7200 MW, soit environ 32% par rapport à la production nationale d'électricité.



Figure (II-15) : L'énergie solaire thermique



Figure (II-16) : Banc d'essais des capteurs solaires plans et chauffe-eau solaire réalisé par la division solaire thermique et géothermie

Développement des capacités industrielles du solaire thermique En Algérie, le potentiel de développement et l'industrialisation du chauffe-eau sont important. Mais la réalité du terrain montre que l'industrialisation du chauffe-eau solaire n'est pas encore amorcée malgré l'existence dans le marché de quelques chauffe-eau solaires fabriqués localement par des opérateurs privés. Ainsi, des actions ont été entreprises par l'Etat pour dynamiser ce secteur du chauffe-eau solaire.

Le projet Alsol, piloté par le ministère d'énergie et des mines, a pour rôle d'amorcer la création d'un marché national du chauffe-eau solaire et de favoriser l'implantation d'une industrie locale. Le volet incitation est renforcé par un projet d'installation de 1000 chauffe-eau solaires individuels sur le territoire national. La subvention de l'Etat est à hauteur de 45% du coût du chauffe-eau solaire installé. Le financement est assuré par le fond National de la Maîtrise de l'Energie (FNME). Dans le domaine de la concentration solaire, le programme national des énergies renouvelables prévoit des actions ambitieuses pour l'industrie des équipements du solaire thermique.

Ces actions sont résumées comme suit :

- La période 2011-2013, les études pour la fabrication locale des composants des centrales thermodynamiques (miroirs, fluide caloporteur et block de puissance). Le taux d'intégration visé est de 7%.
- La période 2014-2020, en plus des actions de renforcement des capacités d'engineering, il est prévu :
 - La construction d'une usine de fabrication des miroirs,
 - La construction d'une usine de fabrication de fluide caloporteur et équipements de stockage,
 - La construction d'une usine de fabrication des équipements du block de puissance.
 - Le taux d'intégration visé est de 50%. [15]

II.7.3 L'énergie géothermique

La géothermie ou « chaleur de la terre » est un potentiel énergétique non exploité par l'Algérie, elle a l'intention d'y remédier. La géothermie se présente sous forme de réservoirs de vapeur, d'eaux chaudes ou de roches chaudes, destinée à différents emplois.

Lorsque le réservoir géothermique est à une température modérée, cette ressource est exploitée pour la production de chaleur distribuée par un réseau de chaleur. Elle est destinée dans ce cas au chauffage urbain.

Lorsque la température du réservoir géothermique est plus élevée elle permet de produire de l'électricité. Il est aussi possible de l'exploiter dans le secteur agricole et c'est dans la production agricole que l'Algérie compte en profiter, dans l'agriculture saharienne plus exactement.

L'Algérie étant le plus grand pays d'Afrique en superficie, elle dispose forcément d'un important potentiel en nappes albiennes (80 % du territoire Algérien). La géothermie reste néanmoins sous exploitée en Algérie. Conscient de ce potentiel non négligeable, une entreprise tunisienne compte investir dans cette « mine d'or ».

Il faut savoir que 38 pays à travers le monde appliquent la géothermie au secteur agricole et 24 autres pour la production d'électricité. [70]

Les calcaires jurassiques du Nord Algérien qui constituent d'importants réservoirs géothermiques, donnent naissance plus de 200 sources thermales localisées dans les régions du Nord-Est et Nord-Ouest du pays. Ces sources se trouvent souvent à des températures supérieures à 40°C, la plus chaude étant celle de Hammam Chellala (ex : Meskhoutine) à 96°C. Ces émergences naturelles qui sont généralement les fruits des réservoirs existants, débitent à elles seules plus de 2 m³/s d'eau chaude.

Plus au Sud, la formation du continental intercalaire, constitue un vaste réservoir géothermique qui s'étale sur 700 mille Km². Ce réservoir, appelé communément « nappe albienne », est exploité à travers des forages à plus de 40 m³/s ; l'eau de cette nappe se trouve à une température moyenne de 57°C. Si on associe le débit d'exploitation de la nappe albienne au débit total des sources thermales, cela représenterais une puissance de plus de 700 MW. Il existe trois zones dont le gradient thermique dépasse les 5°C/100m : Relizane et Mascara ; Aïn Boucif et Sidi Aïssa et Guelma et Djebel El Onk. [12]

L'énergie géothermique est l'une des plus importantes sources d'énergies renouvelables en Algérie. Les utilisations de cette énergie sont multiples. Elles vont des utilisations directes, telles que la pisciculture, le chauffage des serres et la balnéothérapie aux utilisations industrielles, telles que la production d'électricité. Si le potentiel des ressources géothermiques du Nord de l'Algérie est bien déterminé, pour le Sud Algérien aucune étude

détaillée n'a été encore menée. Le but principal de la communication est la présentation du potentiel géothermique du Sud Algérien à travers une esquisse du gradient géothermique. Les résultats sont présentés sous forme de cartes. Ces résultats montrent que le Sud Algérien est caractérisé dans son ensemble par un gradient géothermique moyen $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. La partie Est montre une anomalie thermique qui est de 3 à $4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Le bassin de Béchar est anormalement chaud avec un gradient dépassant les $7^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. A travers la carte réalisée, il convient de conclure que les conditions thermiques sont réunies dans le sud Algérien pour avoir un important potentiel géothermique. [16]

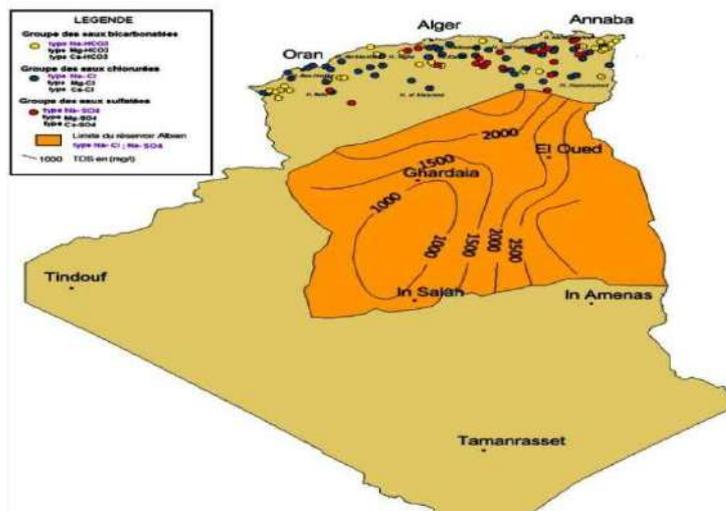


Figure (II-17) : Localisation et température des ressources géothermiques en l'Algérie

La compilation des données géologiques, géochimiques et géophysique a permis de tracer une carte géothermique préliminaire. Plus de 200 sources chaudes ont été inventoriées dans la partie Nord du Pays. Un tiers environ (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à 45°C . Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre 118°C à Biskra.

Si la géothermie en Algérie est de type « moyenne température », il n'en demeure pas moins que les possibilités de son utilisation restent vastes et variés. L'exploitation de cette énergie est devenue de plus en plus attractive du fait du développement des techniques de prospection et d'exploitation. Les différentes possibilités d'application de cette ressource peuvent aller de l'utilisation balnéaire, au chauffage des serres et des locaux, au séchage des produits agricoles comme le tabac et le raisin, à la pisciculture ou encore la production d'électricité. [12]

II.7.4 L'énergie biomasse

Energie produite grâce aux déchets et grâce à la combustion des matières organiques d'origine végétale, animale ou fongique, ou après méthanisation (biogaz), et aussi après de nouvelles transformations chimique.

Parmi les différentes sources énergétiques renouvelables utilisées figurent celle de la biomasse. Elle constitue un gisement en continuelle augmentation en Algérie et présente une très large diversité de composition. Les déchets non traités présentent une source de pollution non négligeable, notamment les décharges, les centres d'enfouissement techniques, les rejets industriels... À cet effet, la valorisation des GES (gaz à effet de serre) émis par ces déchets à des fins énergétiques (sous forme de biogaz) est à envisager.

Le Nord de l'Algérie représente 10% de la surface du pays, soit 2 500 000 hectares. La forêt y couvre 1 800 000 hectares et les formations forestières dégradées en maquis 1 900 000 hectares. Le pin maritime et l'eucalyptus sont des plantes particulièrement intéressantes pour l'usage énergétique: actuellement elles n'occupent que 5% de la forêt Algérienne.

Le potentiel Algérien de la biomasse se compose de la biomasse issue des forêts (environ 37 Mtep. Le potentiel récupéré est de l'ordre de 10%), des déchets urbains et agricoles (estimés à 1,33 Mtep/an c'est à dire 5 millions de tonnes non recyclés).

Dans le cadre d'une éventuelle mise en place d'un plan de développement de traitement et de valorisation énergétique des déchets pour la production de biocarburants en Algérie, la réalisation d'un inventaire des déchets et de la biomasse s'impose. [12]

➤ Le biogaz

Le biogaz est produit par un processus de fermentation anaérobie des matières organiques animales ou végétales. Il se déroule spontanément dans les centres d'enfouissement des déchets municipaux, mais il est possible de le provoquer artificiellement dans les enceintes appelées « digesteurs » où l'on introduit les déchets organiques solides ou liquides et les cultures bactériennes nécessaires à cette transformation. Le biogaz représente un potentiel énergétique encore très mal exploité en Algérie. A titre d'exemple, le biogaz de la station d'épuration d'El Karma (wilaya d'Oran) est récupéré à partir d'un procédé de digestion anaérobie, à raison de 150m³/H .Ce dernier est utilisé actuellement pour le chauffage des digesteurs, à l'aide de chaudières spécifiques, tandis que son excédent est torché pour éviter la

pollution atmosphérique avec le gaz méthane qui constitue 70% du biogaz par rapport aux autres gaz. Une étude de cogénération du biogaz est en cours par le ministère pour la valorisation électrique. [12]

II.7.5 L'énergie hydraulique

Les quantités globales d'eau tombant sur le territoire Algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m³/an . Schématiquement, les ressources de surface du pays décroissent du Nord au Sud. On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables à 25 milliards de m³, dont environ 2/3 pour les ressources en surface.

La part de capacité hydraulique dans le parc de production d'électricité est de l'ordre de 4%, soit 230 MW . Cette faible puissance est due au nombre insuffisant de sites hydrauliques exploitables. [12]

II.7.6 L'énergie éolienne

Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production des Atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie. Ceci a permis l'identification de huit (08) zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes: - deux zones sur le littoral - trois zones sur les hauts plateaux - et quatre zones en sites sahariens. Le potentiel éolien technique de ces régions a été estimé à 172 TWh/an dont 37 TWh/an économiquement exploitable. [17]

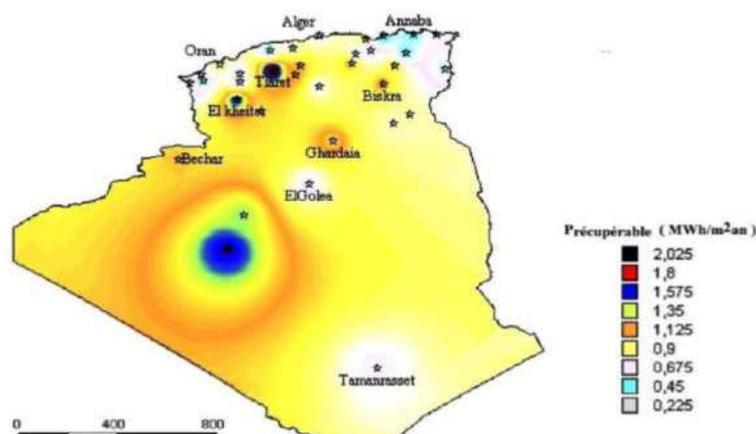


Figure (II-18) : Atlas de la puissance énergétique récupérable à 50m

➤ Atlas éolienne de l'Algérie

Le centre de développement des énergies renouvelables (CDER) a publié un nouvel Atlas éolien de l'Algérie qui donne des informations sur le potentiel éolien à travers plusieurs régions du pays, apprend-on auprès de cet organisme. Constituée de quatre (4) chercheurs, l'équipe a ainsi réalisé des cartes du vent sur la base de données de vitesse de vent horaires et tri horaires enregistrées sur dix (10) années consécutives de 2004 à 2014, dans 74 stations météorologiques de l'Office national de la météorologie (ONM) ainsi que dans 21 stations supplémentaires des pays limitrophes. Grâce à une répartition géographique plus ou moins uniforme entre le Sud et le Nord, le nouvel Atlas Vent à 10 mètres du sol "reflète des changements dans l'estimation de la ressource éolienne comparée aux Atlas précédents, particulièrement au Sahara", relève le CDER. Ainsi, le site d'In Salah affiche une vitesse moyenne du vent de 6,4 (m/s) à côté d'Adrar qui enregistre 6,3 m/s. La wilaya d'Illizi, dotée d'une dizaine de stations, montre des vitesses dépassant les 5 m/s tandis que le site de Hassi R'Mel affiche des vitesses moyennes assez importantes atteignant 6,5 m/s.

Quant au nord du pays, plusieurs microclimats sont également détectés d'Ouest en Est, Dans le cas des Hauts-Plateaux, il est constaté que dans l'extrême Ouest, la région de Mecheria affiche une vitesse moyenne particulièrement intéressante de 5,6 m/s. Une vitesse de 5,6 m/s est enregistrée à Tiaret et de 5,1 m/s à Djelfa, tandis qu'à M'sila, la vitesse moyenne est de 5,3 m/s. [71]

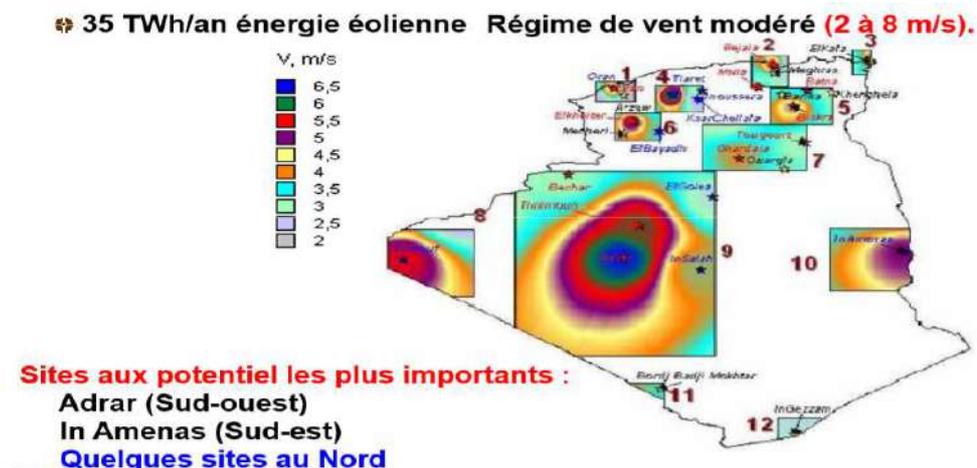


Figure (II-19) : Potentiel éolienne

➤ L'énergie éolienne dans le programme Algérien des énergies renouvelables

Le programme prévoit plus de 70 projets dans différents types d'énergies, dont la réalisation, sur 420 hectares à travers différentes régions du pays, de sept stations éoliennes d'une capacité de production électrique de plus de 200 mégawatts. Le problème qui se pose pour l'énergie éolienne en Algérie, c'est bien le coût du kWh comparativement aux autres ressources renouvelables, notamment l'énergie solaire.

L'énergie éolienne n'est pas exclue du programme car elle constitue le deuxième axe de développement avec une part de production d'électricité qui devrait atteindre environ 3% en 2030. [18]

➤ Le Gisement Eolien de l'Algérie

Ci-dessous la cartographie des vents moyens en Algérie (sur laquelle nous pouvons constater une différence au niveau de la vitesse des vents) On peut ainsi noter que :

Le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que Le Nord, plus particulièrement le Sud-Ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar.

Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée.

On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter (Saida).

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Néanmoins, on remarque que la région de Tiaret fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver le sillage induit par les machines.

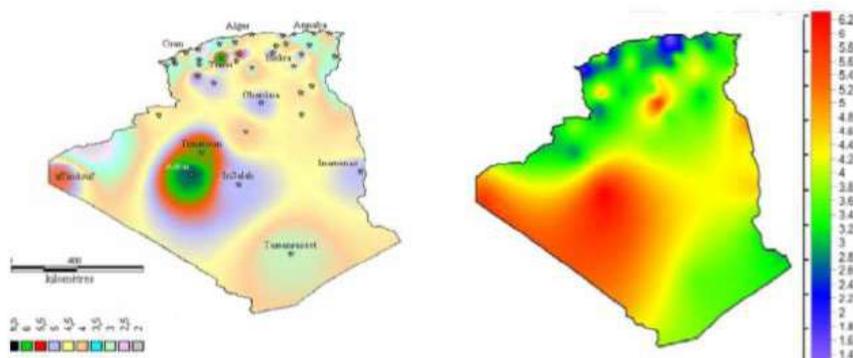


Figure (II-20) : Différence au niveau de la vitesse des vents en l'Algérie

Dans le but d'améliorer l'efficacité énergétique, l'Algérie vise, à l'horizon 2030, un objectif de 40% d'énergie produite par les sources d'énergies renouvelables. Pour l'énergie éolienne, la puissance à installer est près de 2000 MW.

L'année 2014, est la mise en service de 1ère ferme éolienne en Algérie de 12 aérogénérateurs d'une capacité de 10.2 MW qui injecte sur le réseau isolé du Pôle In Salah-Adrar-Timimoun (PIAT).



Figure (II-21) : Implantation de la ferme éolienne de KABERTENE

➤ Les différents blocks constituant la station de KABERTENE

La ferme éolienne de KABERTENE est située sur la wilaya d'ADRAR (Algérie). Il s'agit d'un projet d'installation de 12 éoliennes pour une puissance totale d'environ 10 MW.

- Les blocks constituant la ferme éolienne sont les suivants :

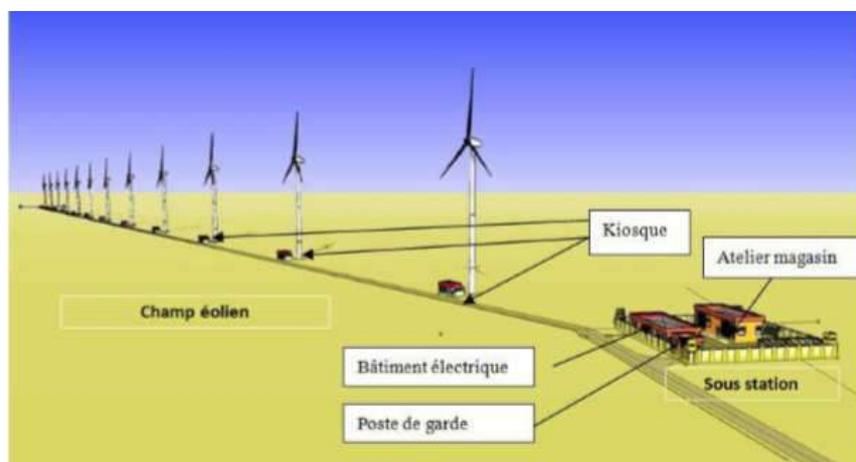


Figure (II-22) : Plan d'implantation de la ferme éolienne de Kabertene

- 12 Kiosques situés au pied de chaque éolienne
- Bâtiment électrique. Contient :
 - Sous station moyenne tension 30KV
 - Salle de commande et contrôle ou se trouve le SCADA et le système de détection d'incendie
- Les éoliennes
- 01 Bâtiment de maintenance. Contient :
 - Atelier
 - Magasin
- 01 Poste de garde. doté par un système de télésurveillance. [2]



Figure (II-23) : La ferme éolienne 2015



Figure (II-24) : Le parc éolien de Keberten (wilaya d'Adrar) en 2014



Figure (II-25) : La ferme éolienne de Kabertène (wilaya d'Adrar) un modèle réussi d'exploitation des énergies propres et renouvelables en 2016

II .8 Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons vu les énergies renouvelables en Algérie, bénéficiant de conditions favorables pour l'utilisation des énergies renouvelables. L'Algérie est parmi les pays avantageux qui puissent utiliser l'énergie renouvelables comme solution du futur pour remplacer l'énergie fossile.

Le développement du photovoltaïque et éolienne en Algérie a connu ces dernières années un nouvel essor dû à l'importance accordée par les pouvoirs publics aux énergies renouvelables.

Le chapitre suivant est consacré à l'étude de l'écoulement de puissance qui est une étape nécessaire pour détecter les problèmes liés aux réseaux électriques, avant de trouver une solution efficace basée sur les énergies renouvelables.

Chapitre III

III.1 Introduction

L'électricité est une forme d'énergie très commode et utile. Elle joue un rôle très important dans notre société industrialisée moderne. A notre époque, et sans électricité, la vie quotidienne serait difficilement envisageable, il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue. Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des usines (centrales électriques) capables de produire de l'électricité en grande quantité. Une fois l'électricité produite, elle doit être amené jusque chez le consommateur. Dans un pays, le transport et la distribution publique assurent le transit de l'énergie électrique entre les points de production et les points de consommation. [72]

Aujourd'hui, l'ingénieur trouve plusieurs difficultés pour planifier et exploiter avec succès les réseaux électriques qui sont parmi les systèmes d'énergie les plus complexes. Cela exige une connaissance, en premier lieu, des priorités et des objectifs. Le premier objectif est d'effectuer le service au coût le plus bas possible. Il est très important de minimiser l'impact environnemental de la production électrique. La continuité du service et la fiabilité sont des considérations majeures. La sécurité du personnel et de l'équipement est un facteur très important par rapport aux autres objectifs. Cependant, il faut classer les objectifs ci-dessus sur une liste prioritaire, mais cette liste varie avec le fonctionnement du système, Ces systèmes d'alimentation font face, aujourd'hui, à plusieurs changements. Sous des conditions normales, les systèmes de transmission électrique « STE » fonctionnent en régime permanent. Les calculs exigeant la caractérisation de cet état sont appelés : l'Écoulement de puissance. [72]

L'étude de l'écoulement de puissance permet d'avoir la solution des grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal équilibré en régime permanent, ces grandeurs sont les tensions aux nœuds, les puissances injectées aux nœuds et celles qui transitent dans les lignes. Les pertes et les courants s'en déduisent. Les études de l'écoulement de puissance permettent de planifier la construction et l'extension des réseaux électriques ainsi que la conduite et le contrôle de ces réseaux. [3]

L'analyse l'écoulement de puissance dans un réseau électrique composé d'un nombre de générateurs, lignes de transmission et des charges est très importante pour les études, la planification et l'exploitation d'un réseau électrique. [19]

III.2 Historique des systèmes électriques

Dans la première moitié du 19^{ème} siècle, la distribution d'électricité se faisait seulement en courant continu, ce dernier a été développé par Thomas Alva Edison en 1882, mais ce type de courant posait plusieurs problèmes comme le changement de niveau de tension et les centrales n'étaient pas capables de fournir de l'électricité sur de longues distances. Beaucoup plus tard Nikola Tesla et George Westinghouse ont inventé des systèmes de distribution sur la base du courant alternatif grâce à l'utilisation des transformateurs électriques. [3]

- 1882 : Installation d'un générateur CC entraîné par roue hydraulique à Appleton, Wisconsin et installation de la première ligne de transport (2400 VCC, 59 KM) en Allemagne;
- 1884 : Frank J. Sprague produit des moteurs CC pour les utiliser dans les réseaux CC d'Edison et développement des systèmes CC à trois fils 220 V;
- 1885 : Développement par William Stanley d'un transformateur pratique permettant le transport à courant alternatif à des tensions plus élevées et à plus grandes distances;
- 1888 : Nikola Tesla présente un article sur les moteurs d'induction et synchrones biphasés mettant en évidence les avantages des systèmes polyphasés par rapport au monophasé;
- 1889 : Installation de la première ligne monophasée au E.U à Oregon (4 KV, 21 Km) ;
- 1891 : Installation de la première ligne triphasée en Allemagne (12 KV, 179 Km);
- 1893 : Installation de la première ligne triphasée aux E.U en Californie (2.3 KV, 12 Km). [20]3

Ce courant peut être acheminé sur de plus grandes distances que le courant continu, il permet de choisir les niveaux de tension adéquats pour limiter les chutes de tension et réduire les pertes. Le choix du meilleur système a provoqué un réel conflit entre les deux inventeurs. Puis, la mise en place du système triphasé fut un succès mondial et les systèmes AC existants fonctionnaient en poches de différentes fréquences. Ensuite, les systèmes électriques ont été développés et hiérarchisés par niveau de tension.

Dans un réseau électrique, la puissance circule des centrales vers les centres de charge, donc des recherches ont été nécessaires pour trouver les tensions des nœuds et la quantité de flux de puissance à travers les lignes de transmission. L'objectif d'une étude de l'écoulement de puissance est d'obtenir des informations complètes sur l'angle et l'amplitude de la tension pour chaque nœud, dans les conditions de fonctionnement du système spécifiées. Une fois cette

information est connue, nous pouvons déterminer analytiquement le flux de puissance active et réactive sur chaque branche. D'autres quantités, telles que les valeurs de courant, les valeurs de puissance et les pertes de puissance, peuvent être calculées facilement lorsque les tensions des jeux de barres sont connues. La solution du problème de flux de puissance commence par l'identification des variables connues et inconnues dans le système qui dépend du type de jeu de barres. [3]

III.3 Écoulement de puissance

III.3.1 Philosophie de l'écoulement de puissance

Dans les réseaux électriques, il existe de nombreux problèmes qui ont des effets sur le but principal qui est le maintien du système de puissance fonctionnel dans son état normal. Parmi ces problèmes, on trouve celui de l'écoulement de puissance. L'étude de l'écoulement de puissance permet d'avoir la solution des grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal, équilibré en régime permanent. Ces grandeurs sont les tensions aux nœuds, les puissances injectées aux nœuds et celles qui transitent dans les lignes. Les pertes et les courants s'en déduisent.

III.3.2 Concept général de l'écoulement de puissance

Le problème de l'écoulement de puissance est résolu pour la détermination en régime permanent des tensions complexes au niveau des jeux barres du réseau, à partir desquelles les transits des puissances actives et réactives dans chaque ligne et transformateur sont calculés. L'ensemble des équations représente le réseau électrique de nature non linéaire.

Pratiquement, dans les méthodes de calcul d'écoulement de puissance, nous exploitons la configuration du réseau et les propriétés de ses équipements pour déterminer la tension complexe au niveau de chaque nœud. d'autre part, il y a une parfaite symétrie entre les trois phases du réseau. [21]

III.3.3 But de l'étude de l'écoulement de puissance

Le but de l'écoulement de puissance se résume dans les points suivants :

- Assurer l'équilibre entre la production et la demande d'énergie électrique (L'amélioration de dépense de l'électricité, production d'énergie selon de besoin) sans dépasser les valeurs limites.
- Il faut conserver les tensions de jeu de barre entre les limites théoriques, en utilisant le contrôle de puissance.
- Planification de réseau (à partir du calcul de la charge).
- Augmenter la sécurité de fonctionnement des réseaux par une bonne stratégie d'EP avant les perturbations.

III.4 Formulation pour l'écoulement de puissance

L'écoulement de puissance sert à déterminer les tensions du réseau de façon à avoir un équilibre entre la génération et la charge. Il consiste à calculer le module et l'angle des tensions aux barres du réseau en régime permanent pour une puissance donnée à la charge. Les réseaux électriques sont caractérisés par des données de barres et de branches. On va définir trois types de barres de la façon suivante, Le jeu de barres de référence généralement sera identifié par le numéro 1 et son module et angle de tension seront toujours spécifiés fixes et connus. Les Jeux de barres de contrôle (PV bus) ont le module de tension maintenu constant, ils sont connectés à un générateur dont la puissance active est connue et constante. Les Jeux de barres de charge (PQ bus) sont les barres dont les puissances actives et réactives injectées sont connues et fixes et grâce à l'écoulement de puissance on va chercher à trouver le module et l'angle de la tension. [20]

III.4.1 Classification des jeux de barres

Il y a quatre grandeurs fondamentales associées à chaque jeu de barres du réseau, à savoir le module de tension, la phase de tension, la puissance active injectée et la puissance réactive injectée. Pour chaque jeu de barres, deux variables doivent être spécifiées au préalable et les deux autres sont à calculer. Dans l'analyse de l'écoulement de puissance, les jeux de barres du système sont classés en trois catégories :

❖ Jeu de barres de référence

Le jeu de barres de référence est choisi parmi ceux où un générateur est connecté. Le rôle de ce jeu de barres est de fournir la puissance supplémentaire nécessaire pour compenser les pertes de transmission, car celles-ci ne sont pas connues d'avance. En plus, ce jeu de barres sert de référence pour les phases des tensions. Par convention, ce jeu de barres est identifié par le jeu de

barres 1, dont le module et la phase de tension sont toujours spécifiés ($V = 1$ pu et $\delta = 0^\circ$). Par conséquent, les puissances sont inconnues, et non spécifiées d'avance. [21]

❖ Jeu de barres de contrôle (PV bus)

Chaque jeu de barres du système dont le module de tension est maintenu constant est considéré comme un jeu de barres à tension contrôlée ou jeu de barres générateur. Ce type de jeux de barres est connecté avec un générateur. [21]

❖ Jeu de barres de charge (PQ bus)

Tous les jeux de barres du réseau dont l'injection des puissances actives et réactives est donnée, sont considérés comme des jeux de barres de charge. [21]

Le tableau (III.1) ci-dessous donne les variables connues et inconnues pour chaque type de jeu de barres

Type du jeu de barres	Variables connues	Variable inconnues
Charge (P,Q)	P, Q	$ V , \delta$
Charge (P,V)	P, $ V $	Q, δ
Référence (slack, swing bus)	$ V , \delta$	P, Q

Tableau (III.1) Les variables au niveau des différents types de jeu de barres

III.5 Évolution des méthodes de l'écoulement de puissance

Au cours des années plusieurs méthodes d'écoulement de puissance ont vu le jour : (Alsac, 1974; Chiang, 1996; Chikhani, 1998; El-Hawary, 1999; Fan, 1989; Hale, 1956; Hart, 1967; Hope, 1982; Kamwa, 2008; Lagacé, 2012a, 2012b, 2015; Milano, 2009; Monticelli, 2000; Reddy, 2009; Tamura, 1981; Zhang, 2001). [3]

III.5.1 Méthodes de l'écoulement de puissance (PF)

Les équations non linéaires qui définissent le problème de flux de puissance nous obligent à utiliser des algorithmes itératifs. Les algorithmes itératifs les plus utilisés sont :

- La méthode de Gauss-Seidel: la première à être utilisée historiquement, mais beaucoup plus lente en convergence lorsqu'elle est appliquée au réseau de grande taille.

- 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.
- Le flux de puissance découplé rapide (FDLF): il s'agit d'une variante de l'algorithme de Newton-Raphson. [3]

III.5.2 Analyse de l'écoulement de puissance

L'étude de l'écoulement de puissance est une étape primordiale de toute analyse sérieuse d'un réseau électrique. En effet, elle nous permet de calculer les grandeurs d'un réseau en régime permanent équilibré à savoir les modules et phases des tensions en tout point du réseau. A partir de ces dernières, on peut calculer les courants dans les lignes de transport, les puissances actives et réactives transitées et les pertes de puissances provoquées lors du transport d'énergie électrique. [22]

III.5.3 Algorithme de résolution du problème de l'écoulement de puissance

La méthode initialement utilisée était la méthode de Gauss-Seidel, qui a l'inconvénient de converger en un nombre d'itérations proportionnel à la taille du réseau. Actuellement, la méthode universellement adoptée est la méthode de Newton-Raphson ou la méthode découplée rapide .

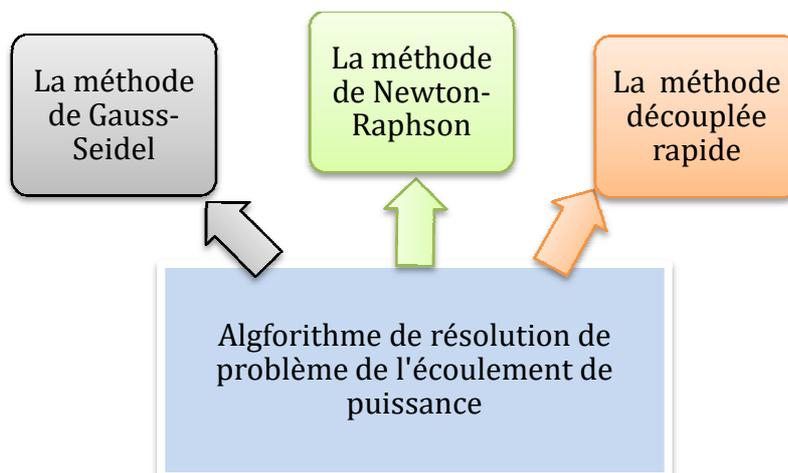


Figure (III-1): Algorithme de résolution du problème de la répartition des charges

III.5.4 Matrice d'admittance

Les équations de l'écoulement de puissance utilisant la formulation des admittances nodales pour un réseau à trois nœuds, sont d'abord développées, puis elles sont généralisées pour un système à nœud. [22]

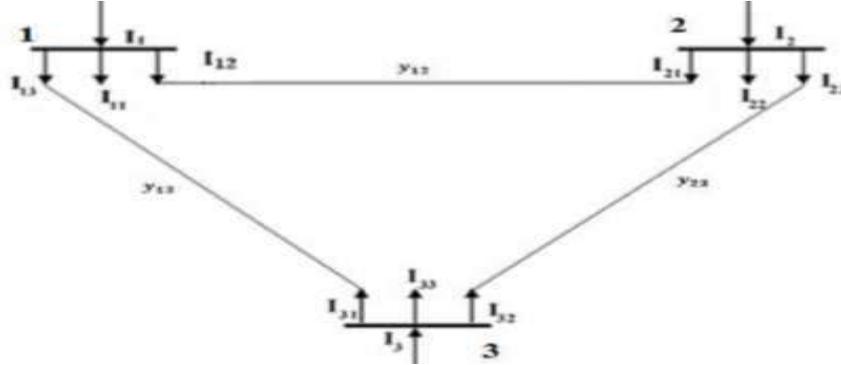


Figure (III-2) Réseaux à 3 nœuds

$$I_1 = I_{11} + I_{12} + I_{13} \quad (\text{III.1})$$

$$I_1 = V_1 Y_{11} + (V_{11} - V_2) y_{12} + (V_1 - V_3) y_{13} \quad (\text{III.2})$$

$$I_1 = V_1 (y_{10} + y_{12} + y_{13}) - V_2 y_{12} - V_3 y_{13} \quad (\text{III.3})$$

En posant :

$$Y_{11} = y_{10} + y_{12} + y_{13} \quad (\text{III.4})$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -y_{12} \quad (\text{III.5})$$

$$Y_{13} = Y_{31} = -y_{13} \quad (\text{III.6})$$

On aura l'expression du courant ci-dessous :

$$I_1 = V_1 Y_{11} + V_2 Y_{12} + V_3 Y_{13} \quad (\text{III.7})$$

De la même manière, on trouve les équations des courants nodaux pour les autres nœuds.

$$I_2 = V_1 Y_{21} + V_2 Y_{22} + V_3 Y_{23} \quad (\text{III.8})$$

$$I_3 = V_1 Y_{31} + V_2 Y_{32} + V_3 Y_{33} \quad (\text{III.9})$$

Ces équations peuvent être écrites sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III. 10})$$

Le courant injecté au jeu de barres i peut se mettre sous la forme

$$I_i = \sum_{m=1}^n Y_{im} V_m \quad (\text{III. 11})$$

III.5.3.1 Les équations de l'écoulement de puissance

Le bilan de puissance électrique à un jeu de barres i d'un réseau électrique de n jeux de barres est égal à la différence entre la puissance générée S_{Gi} et la puissance demandée S_D au niveau du même jeu de barres. [22]

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} = (P_{Gi} - P_{Di}) + j(Q_{Gi} - Q_{Di}) \quad (\text{III. 12})$$

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* \cdot I_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{III. 13})$$

Le courant peut se mettre sous la forme suivante :

$$I_i = \sum_{m=1}^n |Y_{im}| |V_m| \angle(\theta_{im} + \delta_m) \quad (\text{III. 14})$$

En remplaçant l'expression du courant, l'équation (III.13) peut s'écrire:

$$S_i^* = P_i - jQ_i = |V_i^*| - \sum_{m=1}^n |Y_{im}| |V_m| \angle(\theta_{im} - \delta_m) \quad (\text{III. 15})$$

En séparant la partie réelle et la partie imaginaire de l'équation (III.15), nous aurons les équations (III.16) et (III.17) des puissances actives et réactives au jeu de barres :

$$P_i = \sum_{m=1}^n |V_i| |V_m| |Y_{im}| \cos(\theta_{im} - \delta_i + \delta_m) \quad (\text{III. 16})$$

$$Q_i = -\sum_{m=1}^n |V_i| |V_m| |Y_{im}| \sin(\theta_{im} - \delta_i + \delta_m) \quad (\text{III. 17})$$

❖ Equations de l'écoulement de puissance dans les lignes et les pertes

La détermination des valeurs des puissances réparties dans les lignes de transport est indispensable afin de localiser les lignes électriques surchargées et de calculer la valeur des pertes de puissance.

Le courant circulant entre les deux jeux de barres i et m est considéré positif lorsqu'il est dirigé de i vers m et son expression est la suivante :

$$I_{im} = Y_{im}(V_i - V_m) + V_i Y_p \quad (\text{III. 18})$$

Y_{im} : L'admittance de la ligne entre deux jeux barre i et m

$V_i Y_p$: La contribution shunt du courant au jeu de barres i

Y_p : L'admittance shunt au jeu de barres

De la même manière, le courant qui circule du nœud m vers le nœud i est donné par :

$$I_{mi} = Y_{im}(V_m - V_i) + V_m Y_p \quad (\text{III. 19})$$

$$P_{im} - jQ_{im} = V_i^* I_{im} \quad (\text{III. 20})$$

$$P_{im} - jQ_{im} = V_i^*(V_i - V_m)Y_{im} + V_i^* V_i Y_p \quad (\text{III. 21})$$

$$P_{mi} - jQ_{mi} = V_m^*(V_m - V_i)Y_{im} + V_m^* V_m Y_p \quad (\text{III. 22})$$

La valeur des pertes de puissance dans la ligne entre les deux jeux de barres i et m est la somme algébrique de répartition des puissances déterminées à partir des équations (III.21) et (III.22). [22]

III.6 Résolution d'un problème d'écoulement de puissance

III.6.1 Méthode de Gauss Seidel

La méthode de GAUSS-SEIDEL est l'une des plus simples méthodes itératives utilisées pour la résolution du problème de l'écoulement de puissance ou généralement pour la résolution d'un ensemble très large d'équations algébriques non linéaires. [5]

En général, on calcule le vecteur V qui satisfait le système non linéaire et qui est donné par :

$$V_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{(V_i^*)^k} + \sum_{i \neq m} Y_{im} V_m^{(k)} \right] \quad (\text{III. 23})$$

Une fois qu'on trouve les tensions nodales, nous calculons :

- Puissance injectée calculée :

$$P_i = \sum_{m=1}^n |V_i| |V_m| Y_{im} \cos(\theta_{im} - \delta_i + \delta_m) \quad (\text{III. 24})$$

$$Q_i = \sum_{m=1}^n |V_i| |V_m| Y_{im} \sin(\theta_{im} - \delta_i + \delta_m) \quad (\text{III. 25})$$

- Puissance transmise calculée :

$$P_{im} = -|V_i|^2 Y_{im} \theta_{im} + |V_i| |V_m| Y_{im} \cos(\theta_{im} - \delta_i + \delta_m) \quad (\text{III. 26})$$

$$Q_{im} = -|V_i|^2 Y_{im} \theta_{im} + |V_i| |V_m| Y_{im} \sin(\theta_{im} - \delta_i + \delta_m) \quad (\text{III. 27})$$

- Les pertes totales calculées :

$$P_l = \sum P_i \quad (\text{III. 28})$$

$$P_l = \sum (P_{im} + P_{mi}) \quad (\text{III. 29})$$

III.6.2 Méthode de Newton-Raphson

Cette méthode nécessite plus de temps par itération que celle de Gauss-Seidel, alors qu'elle ne demande que quelques itérations même pour les grands réseaux. [22]

- En coordonnées polaires

$$P_i = \sum_{m=1}^n |V_i| |V_m| Y_{im} \cos(\theta_{im} - \delta_i + \delta_m) \quad (\text{III. 30})$$

$$Q_i = \sum_{m=1}^n |V_i| |V_m| Y_{im} \sin(\theta_{im} - \delta_i + \delta_m) \quad (\text{III. 31})$$

- Matrice jacobienne

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (\text{III. 32})$$

J_1, J_2, J_3 et J_4 : sont les sous-matrices de Jacobienne

- **Détermination des sous-matrices de Jacobienne J_i**

A partir du système (III.30),(III.31) nous pouvons déterminer les éléments de J

Sous matrice J_1 :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|Y_{im}| |V_i| |V_m| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), i \neq m \quad (\text{III.33})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^n |Y_{im}| |V_i| |V_m| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), i = m \quad (\text{III.34})$$

Sous matrice J_2 :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = |Y_{im}| |V_m| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), i \neq m \quad (\text{III.35})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|Y_{im}| |V_m| \cos(\theta_{im}) + \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^n |Y_{im}| |V_m| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), i = m \quad (\text{III.36})$$

Sous matrice J_3 :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -|Y_{im}||V_m||V_i| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) , i \neq m \quad (\text{III.37})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^n |Y_{im}||V_m||V_i| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) , i = m \quad (\text{III.38})$$

Sous matrice J_4 :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = -|V_{im}||V_m| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) , i \neq m \quad (\text{III.39})$$

III.6.3 Méthode de Découplée Rapide

En observant la valeur numérique des éléments du Jacobienne utilisée dans plusieurs systèmes, nous découvrons que les éléments de J_1 et J_4 sont invariablement beaucoup plus grands que ceux de J_2 et J_3 ; et en se basant sur les découplés (P δ) et (Q V), on peut supposer qu'à partir de cela, nous pouvons avoir deux systèmes d'équations linéaires indépendantes pour chaque itération. [22]

- Nous calculons les éléments du Jacobien J_2

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_m|} = |V_i||Y_{im}| \cos(\theta_{im} + \delta_i - \delta_m) \quad (\text{III.40})$$

- On calcule les éléments du Jacobien J_3

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_m|} = |V_i||Y_{im}| \cos(\theta_{im} + \delta_i - \delta_m) \quad (\text{III.41})$$

Par conséquent, les sous matrices du Jacobien J_2 et J_3 sont nulles

Il nous reste à calculer les éléments du Jacobienne J_1 et J_4

- Calcul les éléments du Jacobien J_1

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_m|} = |V_i||Y_{im}| \sin(\theta_{im} + \delta_i - \delta_m) \quad (\text{III.42})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i||Y_{im}| \sin(\theta_{im}) + \sum_{m=1}^n |V_m||Y_{im}| \sin(\theta_{im} - \delta_i + \delta_m) \quad (\text{III.43})$$

- Calcul les éléments du Jacobien J_4

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i||Y_{im}| \sin(\theta_{im}) + \sum_{m=1}^n |V_m||Y_{im}| \sin(\theta_{im} - \delta_i + \delta_m) \quad (\text{III.44})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i||Y_{im}| \sin(\theta_{im}) + Q_i \quad (\text{III.45})$$

III.7 Méthodes de l'écoulement de puissance dans PSAT

PSAT se concentre sur la stabilité des méthodes numériques car la défaillance des méthodes de flux de puissance standard est due à l'instabilité de la méthode numérique. Les méthodes robustes de flux de puissance sont très efficaces pour résoudre les cas mal conditionnés. Ce logiciel comprend plusieurs méthodes, tels que :

- La méthode standard de Newton-Raphson (NR) ;
- Le flux de puissance découplé rapide (variations XB et BX) ;
- Les méthodes robustes de la méthode de NR avec des méthodes d'intégration numériques (Trapézoïdale et d'Euler)

Nous avons choisis la méthode standard de Newton-Raphson dans nos calculs car cette méthode est plus performante et donne des meilleurs résultats par rapport aux autres méthodes. . Méthodes de l'écoulement de puissance dans PSAT PSAT se concentre sur la stabilité des méthodes numériques car la défaillance des méthodes de flux de puissance standard est due à l'instabilité de la méthode numérique. Les méthodes robustes de flux de puissance sont très efficaces pour résoudre les cas mal conditionnés. Ce logiciel comprend plusieurs méthodes, tels que:

- La méthode standard de Newton-Raphson (NR) ;
- Le flux de puissance découplé rapide (variations XB et BX) ;
- Les méthodes robustes de la méthode de NR avec des méthodes d'intégration numériques (Trapézoïdale et d'Euler).

Dans ce mémoire, nous avons choisis la méthode standard de Newton-Raphson (Voir l'annexe. A) dans nos calculs car cette méthode est plus performante et donne des meilleurs résultats par rapport aux autres méthodes.

Notez que, dans PSAT seulement la méthode de NR est disponible si un composant dynamique est inclus dans l'analyse du flux de puissance. La figure (III.3) illustre l'organigramme de la méthode Newton Raphson. [3]

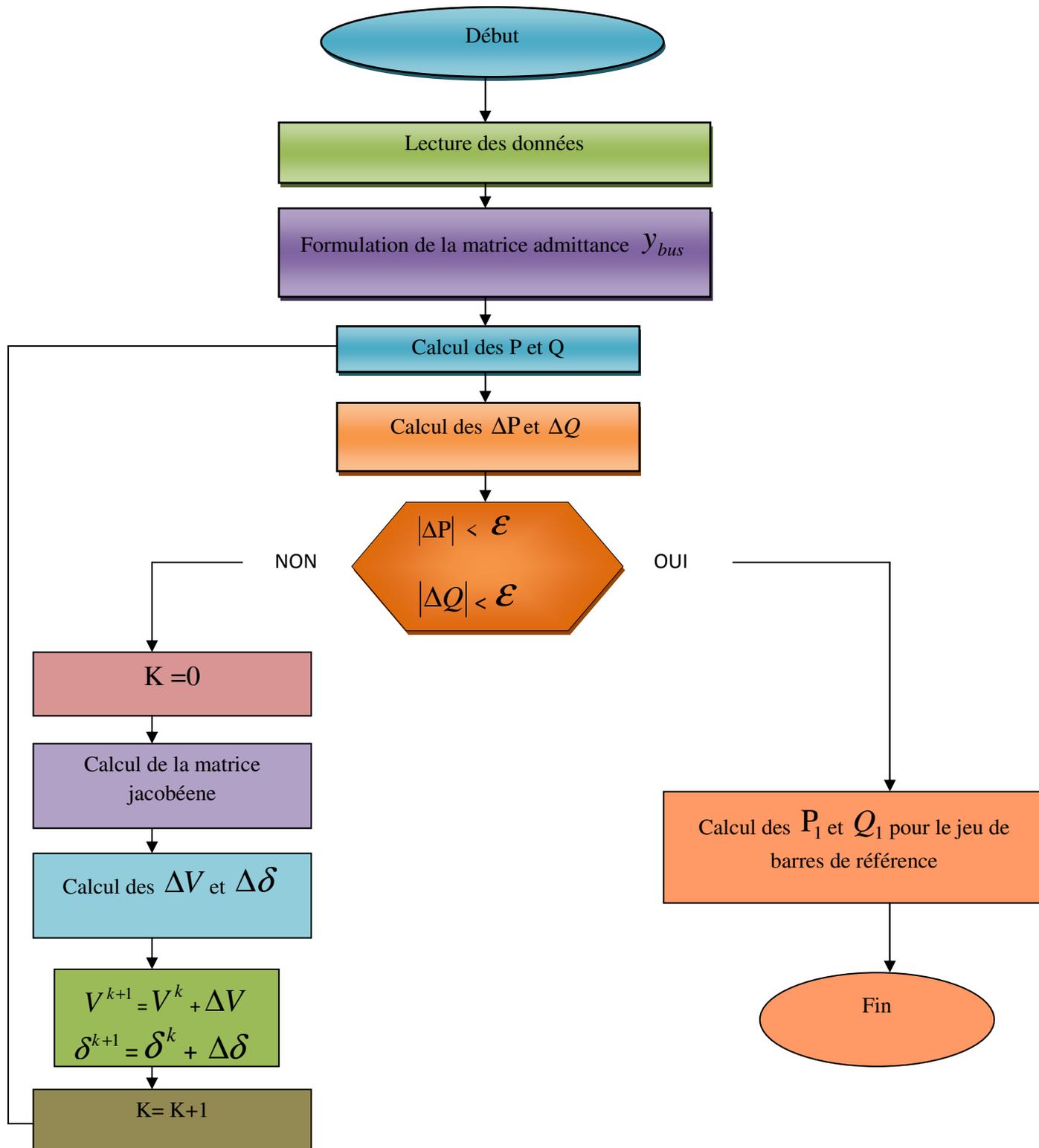


Figure (III-3) Organigramme de la méthode de Newton Raphson

III.8 PSAT (Boîte à outils d'analyse du système d'alimentation):

PSAT est une boîte à outils Matlab pour l'analyse et le contrôle des systèmes électriques. La version de ligne de commande PSAT est également compatible GNU Octave. Toutes les opérations peuvent être évaluées au moyen d'interfaces utilisateur graphiques (IPI) et une bibliothèque basée sur simulink fournit un outil convivial pour la conception du réseau.

Le noyau de PSAT est la routine de flux de puissance, qui prend également soin de l'initialisation variable d'état. Une fois le flux de puissance résolu, d'autres analyses statiques et/ou dynamiques peuvent être effectuées. Ces routines sont les :

- Flux de puissance de continuation.
- Flux de puissance optimal.
- Petite analyse de la stabilité du signal.
- Simulations de domaine temporel.
- Placement de l'unité de mesure de Phasor (PMU).

Afin d'effectuer une analyse précise du système d'alimentation, PSAT prend en charge une variété de modèles de composants statiques et dynamiques, comme suit :

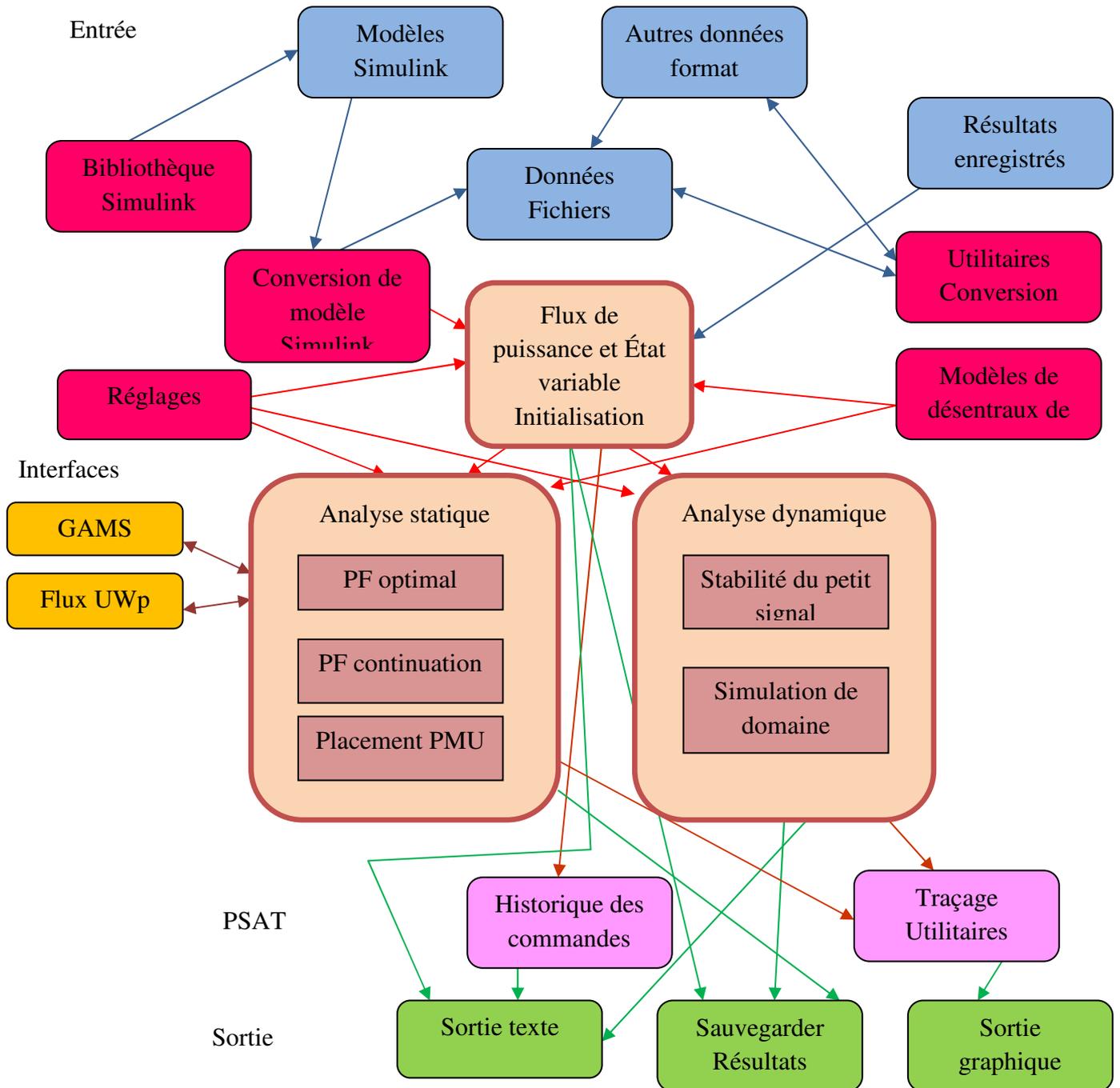
- ✓ *Power Flow Data*: Barres de bus, lignes de transport et transformateurs, PV générateurs, charges de puissance constantes et les admissions shunt.
- ✓ *Données CPF et OPF* : offres et limites d'alimentation, réserves d'énergie génératrices, les données de montée en puissance des générateurs, les offres et les limites de la demande d'énergie.
- ✓ *Opérations de commutation* : défauts de ligne de transmission et disjoncteurs de ligne de transmission.
- ✓ *Mesures* : fréquence des autobus et unités de mesure progressive (PMU).
- ✓ *Charges* : charges dépendantes de la tension, charges dépendantes de la fréquence, ZIP (impédance, charges à courant constant et à puissance constante), charges de récupération exponentielles, charges thermo statiquement contrôlées et les charges mixtes.
- ✓ *Machines* : machines synchrones (commande dynamique de 2 à 8) et induction moteurs (commande dynamique de 1 à 5).
- ✓ *Contrôles* : régulateurs automatiques de tension, stabilisateur de système d'alimentation, limiteurs de surexcitation, et règlement secondaire de tension (Contrôleurs de zone et contrôleurs de cluster).

- ✓ *Transformateurs de régulation* : changez de robinet avec des régulateurs de tension ou de puissance réactive transformateurs de changement de phase.
- ✓ *FACTS*: compensateurs statiques var, condensateurs série commandée par thyristor, statique compensateurs de source synchrone, contrôleurs de flux de puissance unifiés, et systèmes de transmission CC haute tension.
- ✓ *Éoliennes* : modèles éoliens, éolienne à vitesse constante avec cage d'écureuil moteur d'induction, éolienne à vitesse variable avec générateur d'induction doublement alimenté, et l'éolienne à vitesse variable avec générateur synchrone à entraînement direct.
- ✓ *Autres modèles*: arbre dynamique de machine synchrone, phaseur dynamique série RLC circuit, modèle de résonance sous-synchrone, pile à combustible à oxyde solide et sous-transmission équivalents de surface.

Outre les routines mathématiques et les modèles, PSAT comprend une variété de services publics, comme suit:

- Éditeur de diagrammes réseau unique (bibliothèque Simulink).
- GUIs pour le système de paramètres et les paramètres de routine.
- Construction et installation de modèles de l'utilisateur.
- GUI pour tracer les résultats.
- Filtres pour convertir les données vers et depuis d'autres formats.
- Journaux de commande.

PSAT comprend des points vers les programmes GAMS et UWPFLOW, dont la capacité est d'effectuer l'optimisation et la puissance de continuation analyse du flux. La figure (III.4) représente la structure de PSAT. [23]



Figure(III.4) PSAT en un coup d’œil

Il y a une comparaison des bases Matlab actuellement disponibles pour l'analyse de systèmes électriques de puissance suivants :

- Outil de simulation pédagogique (EST).
- MatEMTP.
- Matpower.

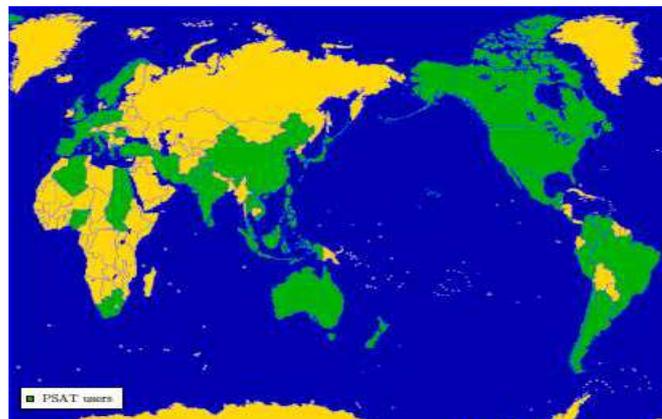
- Power System Toolbox (PST).
- Boîte à outils d'analyse de puissance (PAT).
- SimPowerSystems (SPS).
- Boîte à outils de stabilité de tension (VST).[6]

III.9 Utilisateurs

Le PSAT est actuellement utilisé dans plusieurs pays :

Algérie, Argentine, Australie, Belgique, Brésil, Canada, Chili, Chine, Colombie, Costa Rica, Croatie, République tchèque, Égypte, El Salvador, France, Allemagne, Grande-Bretagne, Grèce, Guatemala, Hong Kong, Inde, Indonésie, Iran, Italie, Japon, Corée, Laos, Macédoine, Malaisie, Mexique, Pays-Bas, Nouvelle-Zélande, Nigéria, Norvège, Pérou, Philippines, Pologne, Porto Rico, Roumanie, Espagne, Slovénie, Afrique du Sud, Soudan, Suède, Taïwan, Thaïlande, Turquie, Uruguay, États-Unis, Venezuela et Vietnam.

La figure (III.5) représente les utilisateurs de PSAT à travers le monde. [23]



Figure(III.5) : PSAT dans le monde entier.2010

III.9.1 Lancement du PSAT :

Après avoir défini le dossier PSAT dans le chemin Matlab, tapez à partir de l'invite Matlab:

```
>> psat . Cela créera toutes les structures requises par la boîte à outils.
```

III.9.2 Chargement des données :

Presque toutes les opérations nécessitent le chargement d'un fichier de données. Le nom de ce fichier est toujours affiché dans le texte d'édition Fichier de données de la fenêtre principale. Pour charger un fichier double-cliquez simplement sur ce texte d'édition ou utilisez le premier bouton de la barre menu Fichier (ouvrir) fichier de données ou le raccourci « Ctr-d » lorsque la fenêtre principale est actif. Le fichier de données peut être un fichier .m au format PSAT ou un modèle simulink créé avec la bibliothèque PSAT (figure 4). Si la source est dans un format différent pris en charge par la conversion de format PSAT , effectuez d'abord la conversion afin de créer le fichier de données PSAT. Il est également possible de charger les résultats précédemment enregistrés avec PSAT en utilisant le deuxième bouton à gauche de la barre d'outils, le menu Fichier (ouvrir) système enregistré ou le raccourci « Ctr-y ». Pour permettre la portabilité sur différents ordinateurs, les fichiers sont utilisés pour enregistrer les résultats du système incluent également les données d'origine qui peuvent être enregistrées dans un nouveau fichier de données .m. Ainsi, après le chargement du système enregistré, toutes les opérations sont autorisées, y compris la visualisation des résultats précédemment obtenus.

Il existe une deuxième classe de fichiers qui peut être éventuellement chargée, c'est-à-dire la perturbation ou de perturbation.

III.9.3 Exécution du programme :

La définition d'un fichier de données ne charge ni ne rencontre à jour les structures des composants. Une pour ce faire, il faut faire fonctionner le pouvoir routine de flux, qui peut être lancé en plusieurs de la fenêtre principale (par exemple par le raccourci « Ctr-p ». Les données sont également mises à jour en cas de modifications du modèle simulink chargé à l'origine. Il n'est donc pas nécessaire de recharger le fichier à chaque fois modifié. Après avoir résolu la première puissance flux, le programme est prêt pour une analyse plus approfondie, comme flux de puissance de continuation, flux de puissance optimal, petite analyse de stabilité du signal, simulation dans le domaine temporel, PMU placement, etc. Chacune de ces procédures peut être lancée à partir de la barre d'outils ou la barre de menus de la fenêtre principale.

III.9.4 Affichage des résultats :

Les résultats peuvent généralement être affichés de plusieurs manières, soit au moyen d'une interface utilisateur graphique dans Matlab ou sous forme de fichier texte ascii.

Certains calculs et plusieurs actions utilisateur entraînent également des messages stockés dans la structure de l'histoire. Ces messages (résultats) sont affichés un à la fois dans affichage de texte statique en bas de la fenêtre principale. En double-cliquant sur cet affichage ou en utilisant le menu options (historique) une interface utilisateur affichera le dernier message. Cet utilitaire peut être utile pour débloquer des erreurs de données ou pour vérifier la performance des procédures.[23]

III.9.5 Enregistrement des résultats :

A tout moment, le menu fichier (Enregistrer) système actuel ou le raccourci « Ctr-a » peut être invoqué pour enregistrer l'état réel du système dans un fichier (.mat). Toutes les structures globales utilisées par PSAT sont stockés dans ce fichier qui est placé dans le dossier du fichier de données courant et a l'extension (.out). Le fichier de données lui-même est également sauvegardé, pour garantir la portabilité sur différents ordinateurs. [23]

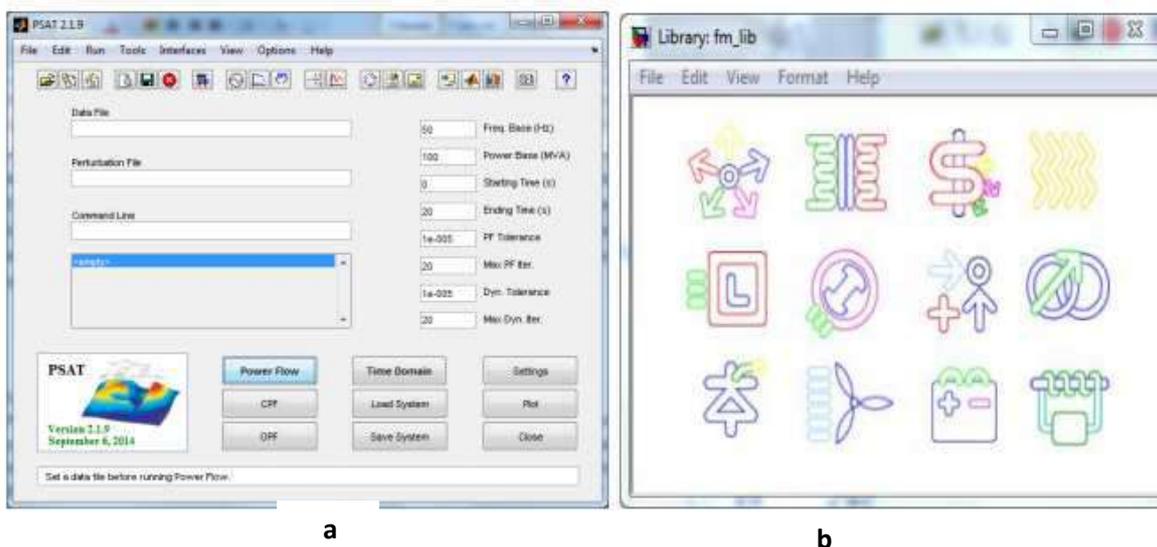


Figure (III.6) (a) Interface de PSAT, (b) Bibliothèque Simulink de PSAT

III.9.6 Réglages

Les principaux paramètres du système sont directement inclus dans la fenêtre principale et ils peuvent être modifiés à tout moment.

Ces paramètres sont :

- ✓ les fréquences
- ✓ les bases de puissance,
- ✓ heures de début
- ✓ fin de simulation,
- ✓ tolérance statique et dynamique
- ✓ maximum nombre d'itérations.

D'autres paramètres généraux, tels que le pas de temps fixe utilisé pour simulations de domaine temporel ou le réglage pour forcer la conversion des charges PQ en impédances constantes après les calculs de flux, peuvent être modifiés dans une fenêtre (dans la fenêtre principale, recherchez le menu édition (paramètres) généraux ou utilisez le raccourci « Ctr-k »). Les paramètres personnalisés peuvent être enregistrés et utilisés comme valeurs par défaut pour la prochaine session via le menu fichier (enregistrer) paramètres. [23]

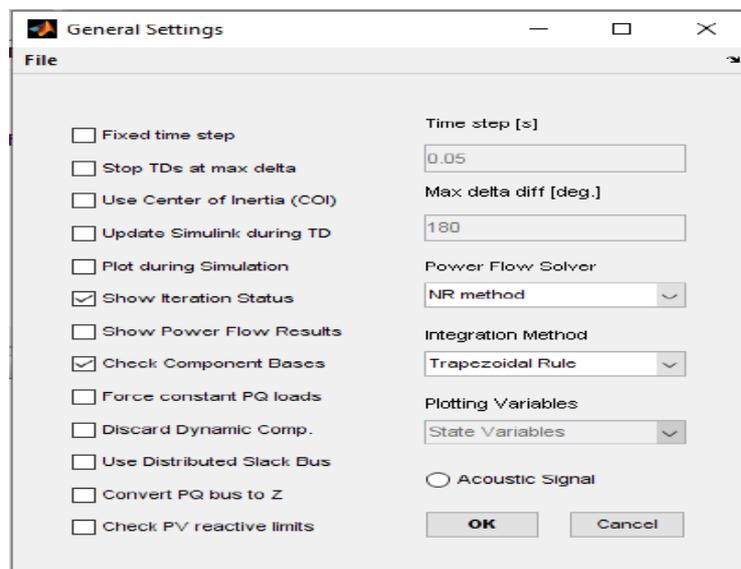


Figure (III-7): Interface pour les paramètres de l'écoulement de puissance.

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons vu en général l'écoulement de puissance ; son objectif, son analyse, son problème et les méthodes de l'écoulement de puissance ainsi que l'état de l'art des méthodes utilisées pour résoudre ce problème. Dans un deuxième temps, nous calculerons l'écoulement de puissance par la méthode de Newton Raphson à l'aide de l'outil de simulation PSAT. Ou nous avons défini ce dernier, et nous avons cité quelque éclaircissement sur son utilisation. C'est à partir de cet outil de simulation que nous allons cerner les différents problèmes du réseau d'étude réel (réseau du Sud Ouest Algérien).

Chapitre IV

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, qui comprend une partie simulation et une partie réalisation d'une maquette nous allons étudier l'impact du parc éolien sur le réseau Sud Ouest Algérie de la wilaya d'Adrar (le réseau PIAT). Pour valider cette étude, nous allons appliquer le calcul de l'écoulement de puissance en adoptant la méthode de Newton Raphson (NR) sans et avec le parc éolien

Ce chapitre présente la simulation du pôle Ain salah – Adrar – Timimoun et le réseau RIN (réseau interconnecté du nord) qui cible les wilayas de Saida - Naama - Bechar , en utilisant comme outil de simulation le logiciel PSAT avant et après l'installation des sources renouvelables (centrale photovoltaïque et parc éolien) , que nous avons appuyé avec une maquette représentative.

Premièrement toutes les composantes de la topologie de ce réseau doivent être dessinées dans l'environnement PSAT. Après ça les données devraient être introduites exactement dans la boîte de dialogue de chaque élément de ce réseau. Finalement, tout le système doit être exposé à un test de simulation sans l'insertion de l'énergie éolienne pour but de prouver que la centrale injectée apporte des améliorations, soit pour soulager le réseau et minimiser la saturation soit pour améliorer les performances électriques des paramètres de ce dernier.

IV.2 Evolution de la consommation d'électricité en Algérie

L'évolution de la consommation est scindée en deux mouvements

L'évolution de la consommation spécifique et l'arrivée de nouveaux consommateurs, que ce soit au secteur industriel qu'il s'agisse des entreprises existantes ou à venir ou au secteur domestique. L'arrivée de nouveaux consommateurs domestiques sur le réseau dépend en premier lieu de l'évolution démographique qui représente un mouvement à grande inertie, dont la trajectoire est facilement prévisible. Le nombre d'abonnés au réseau électrique est passé de 4,5 millions en 2000, à près de 9 millions au début de l'année 2016. Le taux d'électrification est ainsi passé de 88,7% en 2000 à 99% à la fin de 2016.

Aujourd'hui, le souci est double car il s'agit de préserver les ressources énergétiques d'origine fossile dont les réserves s'épuisent de jour en jour pour répondre aux défis de l'heure actuelle. C'est pourquoi, le gouvernement s'est orienté vers la mise en valeur des ressources inépuisables, tel que le soleil, qui place l'Algérie au rang des pays les plus nantis.

IV.3 Evolution du réseau électrique Algérien

IV.3.1 Transport d'électricité

L'évolution de la demande d'énergie électrique nationale a poussé le groupe Sonelgaz à développer son réseau, à passer au palier des 400 kV et à développer les interconnexions internationales avec nos voisins Tunisiens et Marocain en vue de mettre en œuvre la boucle électrique méditerranéenne pour un système SPTE sécurisé, stable et homogène.

Nous citons les nouvelles lignes 400 kV d'interconnexion internationale mises en service récemment :

- La ligne 400 kV Algérie-Tunisie (Cheffia-Djendouba).
- Les deux lignes 400 kV Algérie-Maroc (Les deux lignes Bourdim-Oujda).
- D'autres projets de lignes de transport reliant l'Algérie à l'Europe, notamment deux liaisons par câbles sous-marin directs avec l'Espagne et l'Italie sont en cours d'étude.

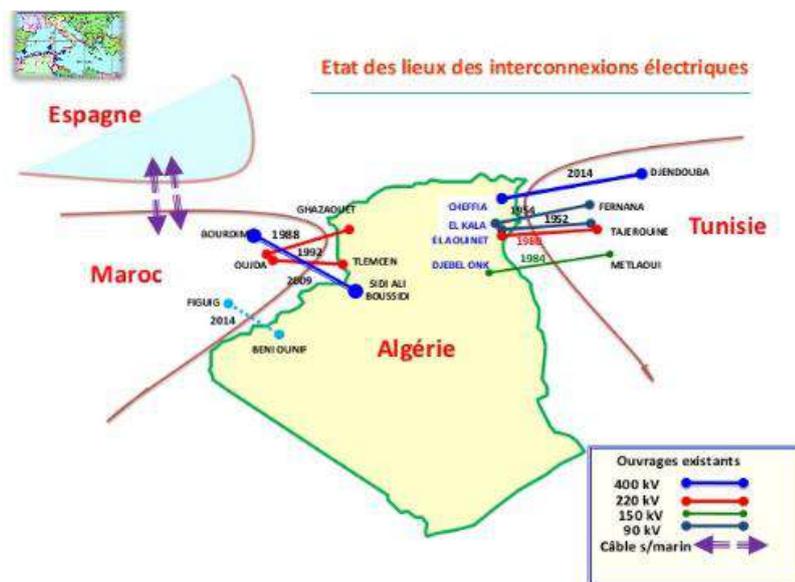


Figure (1V-1) : Les interconnexions internationales existantes sur le RIN

IV.3.2 Le Réseau Interconnecté du Nord « RIN »

Le RIN s'étale sur le nord du pays et couvre aussi les régions de Béchar, Hassi- Messoud, Hassi R'mel, Ghardaia, Saida et Naama. Son alimentation en électricité est assurée par un parc d'environ 17800 MW (2017), relié à travers un réseau de transport 220 kV et 400 kV. Durant les dix dernières années, la puissance maximale appelée (PMA) du réseau interconnecté du nord est passée de 5 921 MW en 2005 à 14 182 MW en 2017, soit une évolution moyenne annuelle de 7.5%.

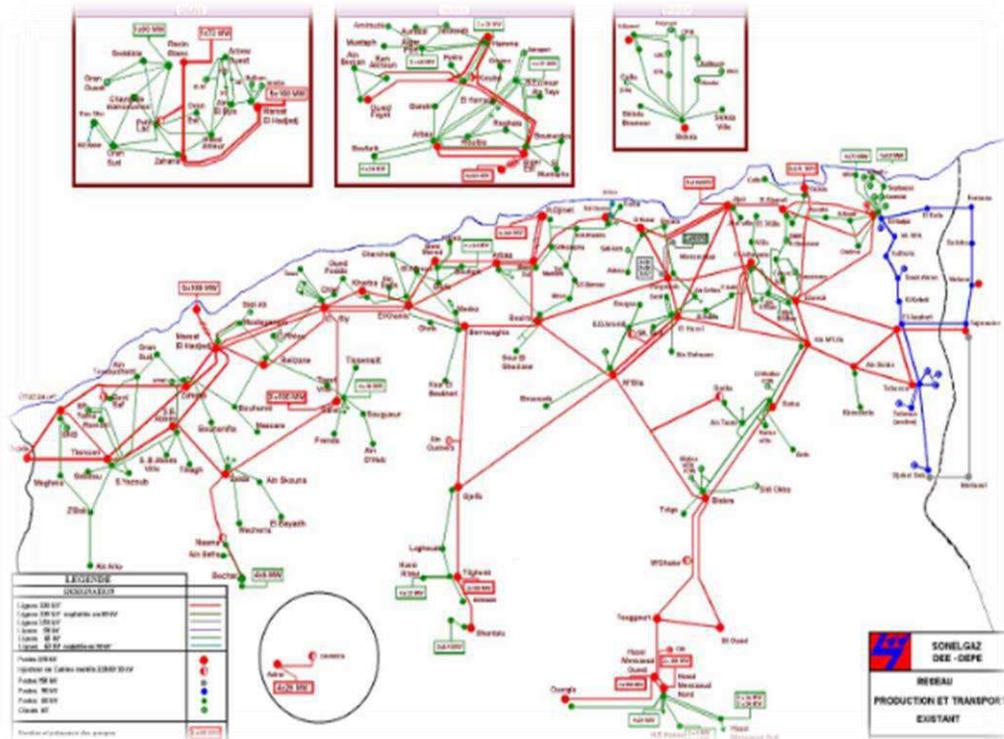


Figure (IV-2) : Le schéma du réseau SPTE du RIN

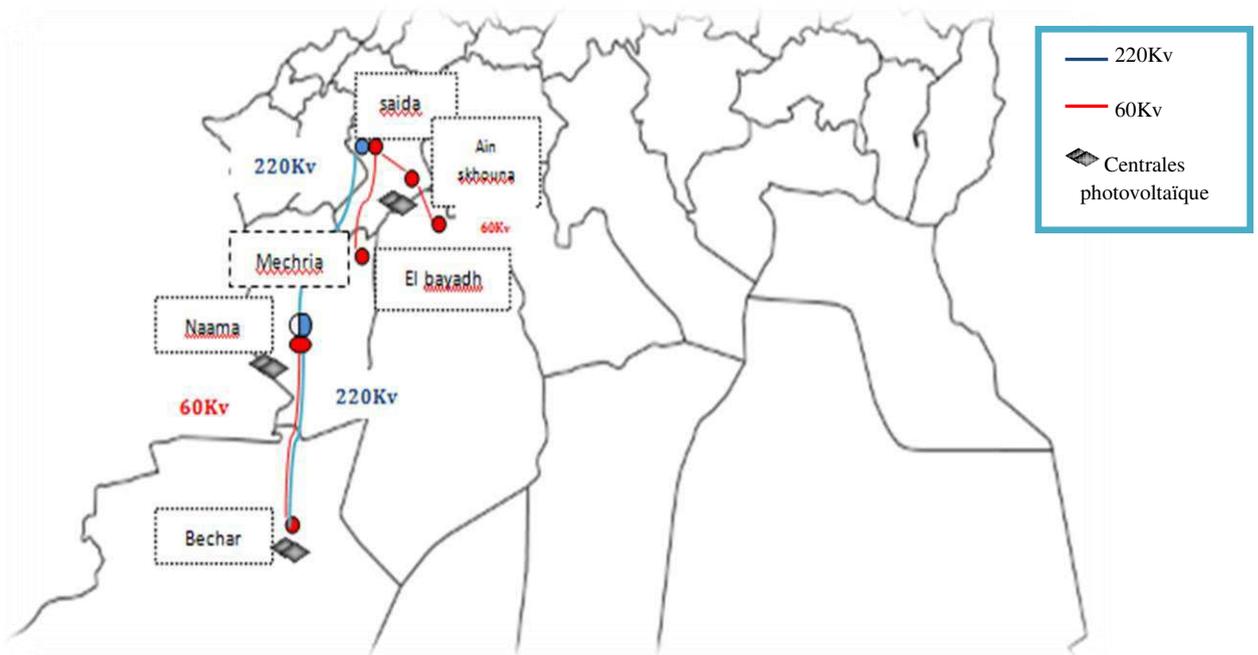


Figure (IV-3) : Topologie du réseau Algérien (Saida-Naama-Bechar)

IV.3.3 Le pôle d'IN- SALAH, ADRAR et TIMIMOUN « PIAT »

Ce réseau assure la connexion d'In-Salah à Timimoun en passant par Aoulef par des lignes 220 kV, il est alimenté par les centrales d'Adrar, In- Salah, Kabertene, Timimoun et Zaouiet-Kounta, ainsi que des centrales PV et une ferme éolienne de 10 MW.

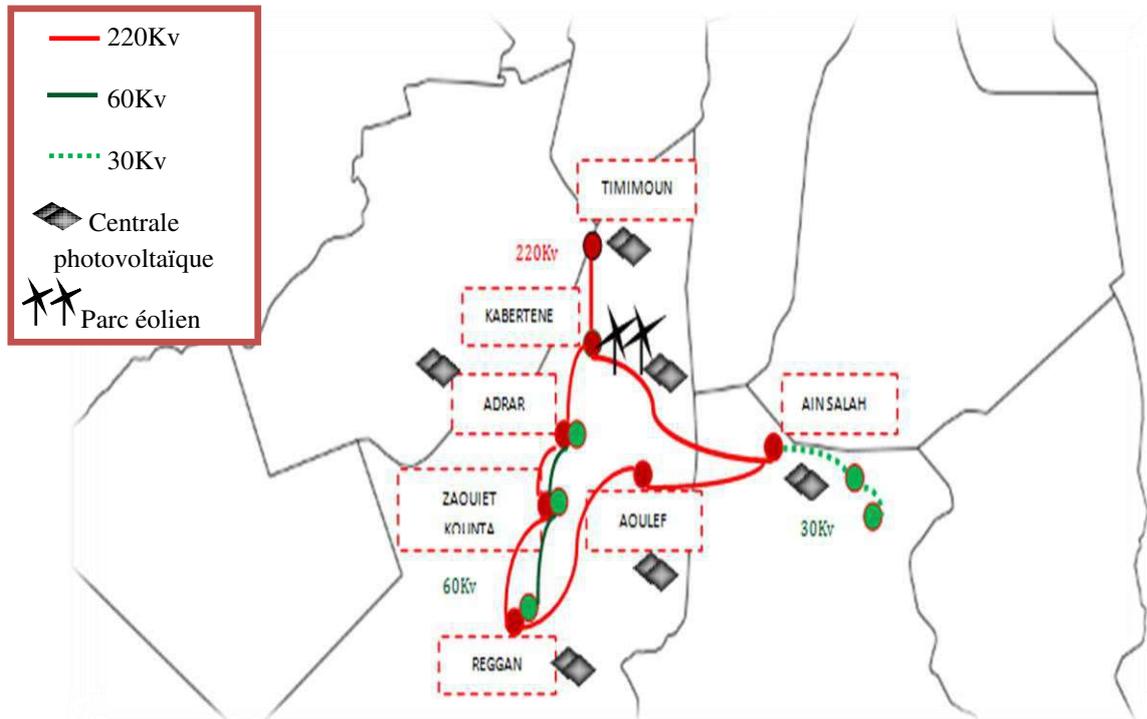


Figure (IV-4) : Topologie du réseau Algérien (Adrar-Timimoun-Ain salah)

IV.3.4 Les Réseaux Isolés du Sud « RIS »

Il s'agit de 30 sites du grand sud, alimentés par des réseaux locaux à travers des groupes diesels, des TG ou des sources photovoltaïques et cela compte tenu des distances mises en jeu et des niveaux de consommation relativement faibles. .[1]

IV.4 Identification du réseau isolé d'ADRAR (PIAT)

- Longueurs très importantes des lignes électriques.
- Faibles charges transportées sur des lignes THT très longues.
- Réseau radial et arborescent.
- Faibles puissances installées dans quelques sites de la région.
- Pas de redondance de transformateur dans la plus part des postes.
- Manque de moyen de production au niveau de quelques régions du réseau PIAT. .

- Moyens importants d'absorption de l'énergie réactive dans les lignes THT de transport.
- Pas de réseaux intermédiaires ou de répartition. .

IV.5 La problématique

D'après les informations collectées et leur synthèse nous avons constaté que :

1. Le taux de développement de la charge de Kabertene est très important entre l'année 2011 et 2017 qui est de 20%.
2. La puissance installée au poste de Kabertene se sature aux environs de l'année 2025.
3. La faible production au niveau de Kabertene.
4. L'éloignement des sources d'alimentation de cette région Adrar (70 km).
5. La puissance installée au poste de Kabertene ne sera pas suffisante pour supporter la charge appelée par la distribution de la région. .

IV.6 La première solution proposée

Puisque Adrar se situe au sud (Sahara) où les conditions climatiques marquent des chiffres très élevés pendant l'année, c'est-à-dire la vitesse du vent et le rayonnement solaire sont disponibles, gratuits et aussi une énergie non polluante. Donc l'injection d'un parc éolien d'une centrale photovoltaïque sera la solution la plus proche face à cette problématique.

IV.7 La simulation du réseau PIAT réel sur PSAT

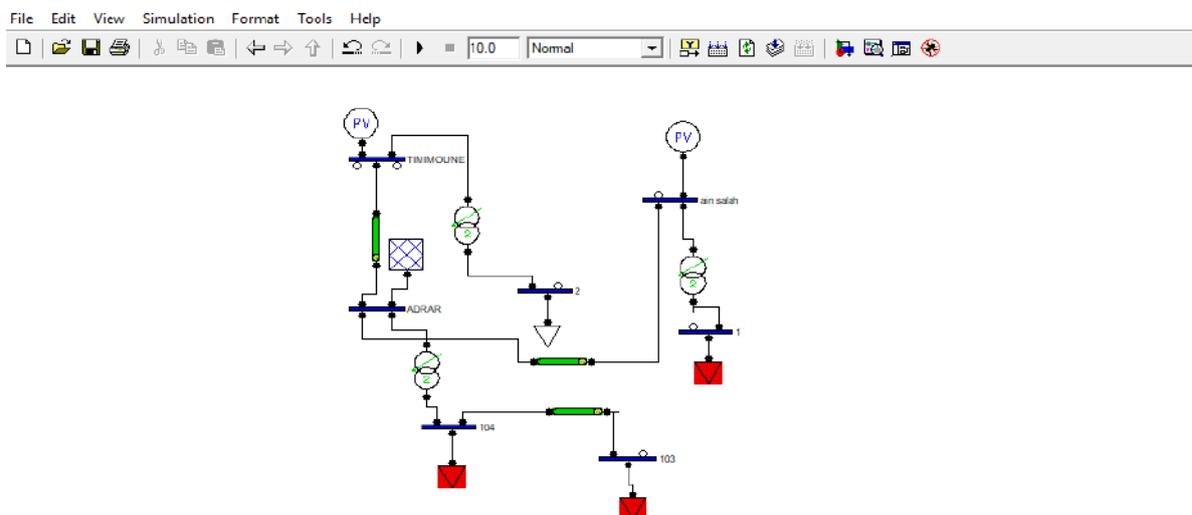


Figure (IV-5) : Schéma du réseau électrique PIAT dans le PSAT.

Nous avons effectué plusieurs cas de simulation. Nous présentons dans les tableaux qui suivent les résultats des tensions nodales sans l'utilisation du parc éolien et centrale PV .

IV.7.1 Les résultats de simulation

Les résultats de l'écoulement de puissance du réseau PIAT sont obtenus après avoir choisit la méthode de Newton-Raphson (par défaut dans le logiciel).Ce programme converge en 6 itérations. Voir les tableaux :

Nœuds	$V [pu]$	Phase [rad]	$P_{gen} [pu]$	$Q_{gen} [pu]$	$P_{charge} [pu]$	$Q_{charge} [pu]$
1	1.002	-0.04313	0	0	0.14003	0.02544
2	1.002	-0.04313	0	0	0.14003	0.02544
103	0.6659	-0.74826	0	0	0.76213	0.15104
104	0.70893	-0.58935	0	0	0.8638	0.17119
ADRAR	1.06	0	1.9442	2.6174	0	0
TIMIMOUNE	1	-0.00744	0.01	-0.39695	0	0
AIN SALAH	1	-0.00744	0.01	-0.39695	0	0

Tableau (IV.1) : Résultats des tensions nodales en (pu) du réseau PIAT avant l'incorporation des sources renouvelables

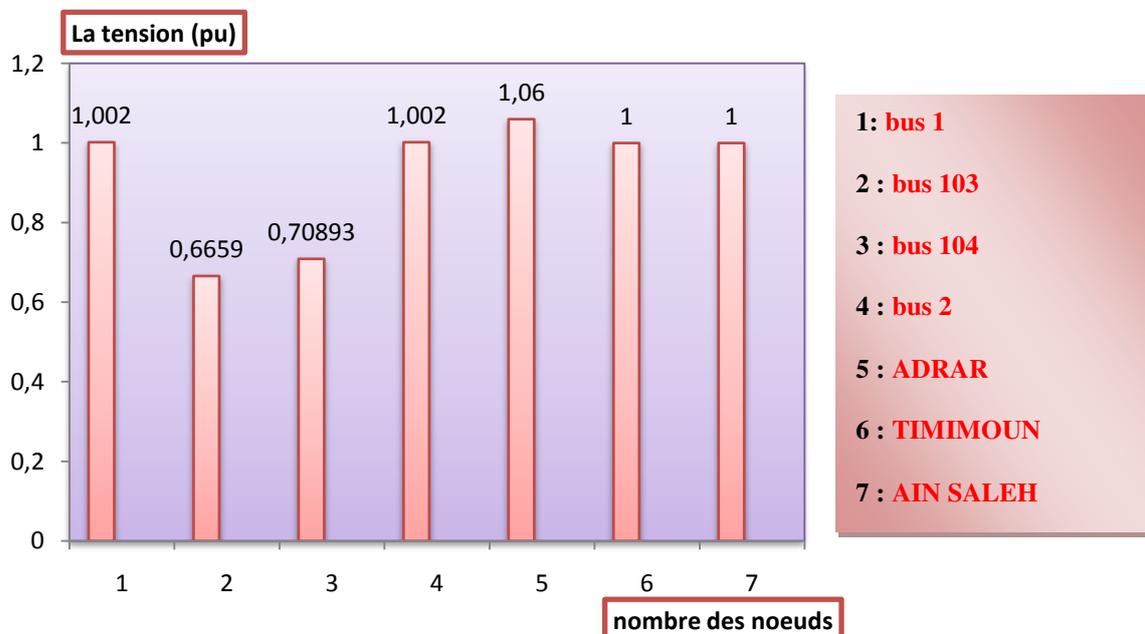


Figure (IV -6) : Profils d'amplitudes de tensions en (pu) en fonction des nœuds du réseau PIAT

Le tableau qui suit représente les puissances actives et réactives transitées entre les lignes et les pertes actives et réactives du réseau.

Lignes	Liaison	Puissance active [pu]	Puissance réactive [pu]	Pertes actives [pu]	Pertes réactives [pu]
1	TIMIMOUNE-ADRAR	-0.13015	-0.42762	0.00487	-0.09454
2	ADRAR-AIN SALAH	0.13503	0.33308	0.00487	-0.09454
3	104 - 103	0.77574	0.28669	0.01361	0.13565
4	ADRAR-104	1.6741	1.9512	0.03459	1.4933
5	TIMIMOUNE-2	0.14015	0.03066	0.00012	0.00523
6	AIN SALAH -1	0.14015	0.03066	0.00012	0.00523

Tableau (IV.2): Résultats de puissances transmises active, réactive et les pertes du réseau en (pu) PIAT avant l'incorporation des sources renouvelables

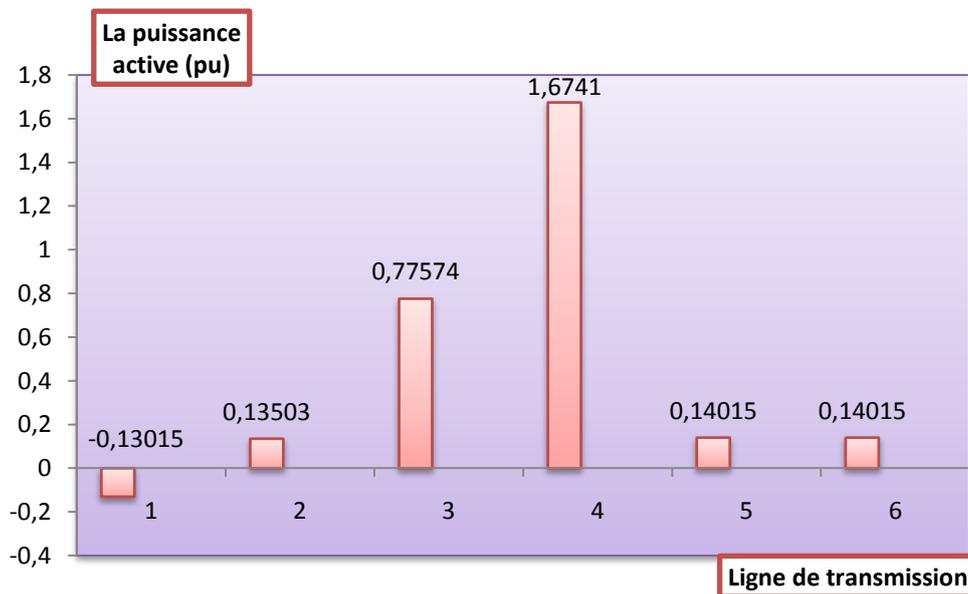


Figure (IV-7) : Flux de puissance active en (pu) dans les lignes du réseau PIAT

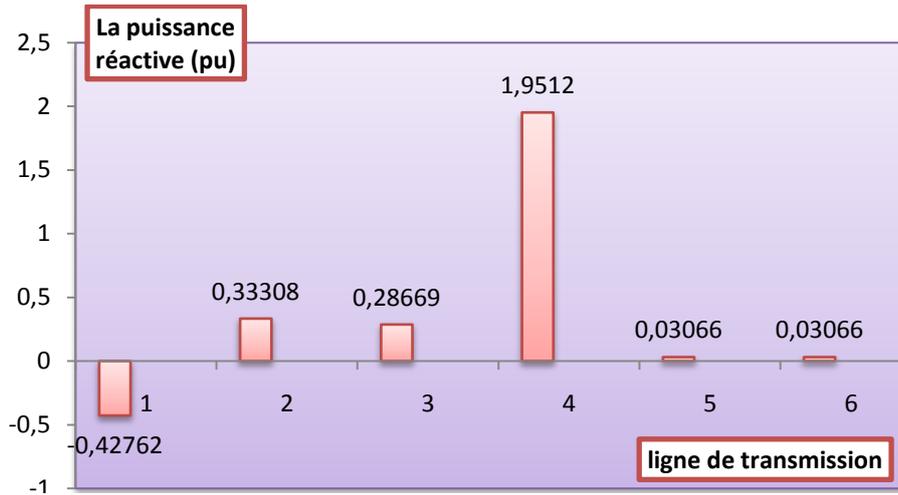


Figure (IV.8) : Flux de puissance réactive en (pu) dans les lignes du

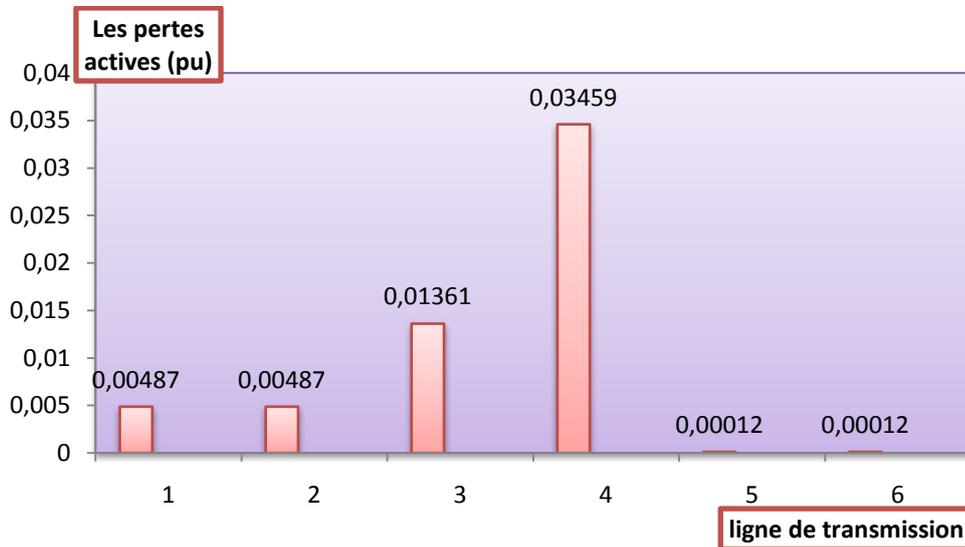


Figure (IV-9) : Les pertes actives en (pu) dans les lignes de transmission du réseau PIAT

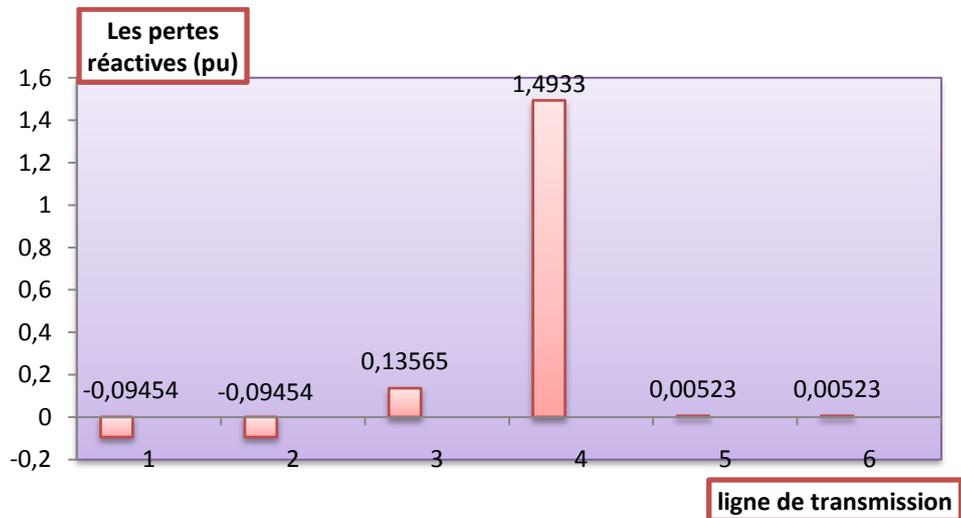


Figure (IV-10) : Les pertes réactives en (pu) dans les lignes de transmission du réseau PIAT.

Le tableau qui suit représente les résultats de la production, la charge, et les pertes totales des puissances actives et réactives du réseau étudié.

	<i>Puissance active [pu]</i>	<i>Puissance réactive [pu]</i>
<i>La production totale</i>	1.9642	1.8235
<i>La charge totale</i>	1.906	0.37311
<i>Les pertes totales</i>	0.05819	1.4504

Tableau (IV.3): La production, la charge et les pertes totales du réseau PIAT

IV.7.2 Analyse et discussion

Nous avons utilisé les figures (IV-9) et (IV-10) pour visualiser et localiser les lignes qui provoquent les plus grandes quantités de pertes dans la pratique. En ce qui concerne les allures des pertes actives et réactives dans ces figures, nous remarquons que le réseau souffre d'un problème de pertes actives et réactives au niveau des lignes suivantes :

- ligne N° 3 : nœuds 104-103,
- ligne N° 4 : nœuds ADRAR-104,

La figure (IV-6) 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 suivants :

- Nœud N° 3 : 103 (0,6659 p.u),
- Nœud N°4 : 104 (0,70893 p.u),

➤ **Interprétation :**

Le calcul de l'écoulement de puissances par la méthode de Newton-Raphson , nous a permis de déduire l'interprétation des résultats des simulations effectuées du réseau PIAT, sans l'introduction des sources renouvelables , qui sont les suivants :

- Nous remarquons une baisse de tension pour les nœuds 03, 04 respectivement (0.6659 pu , 0.70893 pu)
- La puissance active générée est de 1.9642 p.u pour le nœud bilan.
- La puissance réactive générée est de 1.8235p.u pour le nœud bilan.

Le tableau(IV-4) représente seulement la variation de la tension des nœuds avant et après l’insertion de centrale PV et le parc éolien sachant que le réseau PIAT modifié (avec intégrations des sources renouvelables) possède un réseau de 11 nœuds .

Nœuds	Tension sans PV et le parc éolien (pu)	Tension avec PV et le parc éolien (pu)
1	1.002	1.0007
2	1.002	1.0007
103	0.6659	1.0009
104	0.70893	0.9957
ADRAR	1.06	1.06
TIMIMOUNE	1	1
AIN SALAH	1	1

Tableau (IV-4) : Les tensions nodales en (pu) sans et avec les centrales PV et le parc éolien

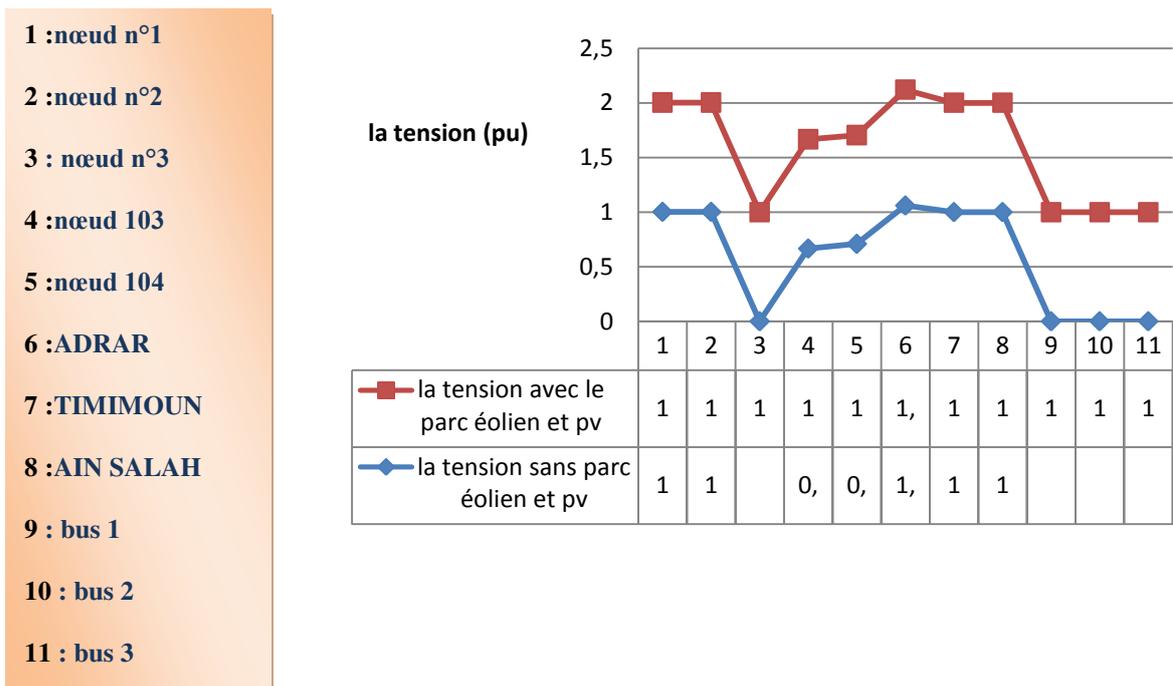


Figure (IV-12): La variation de la tension en (pu) avant et après l’insertion du parc éolien et PV

Les résultats obtenus des pertes actives et réactives des lignes sans et avec intégration des centrales PV et le parc éolien sont donnés par le tableau ci-dessous :

Les lignes	Les pertes actives sans PV et parc éolien [pu]	Les pertes réactives sans PV et parc éolien[pu]	Les pertes actives avec PV et parc éolien[pu]	Les pertes réactives avec PV et parc éolien[pu]
1	0.00487	-0.09454	0.0048	-0.0949
2	0.00487	-0.09454	0.0048	-0.0949
3	0.01361	0.13565	0.00225	0.02154
4	0.03459	1.4933	0.0015	0.06465
5	0.00012	0.00523	5e -005	0.00202
6	0.00012	0.00523	5e -005	0.00202

Tableau (IV-5): Les pertes actives et réactives en (pu) avec et sans PV et parc éolien

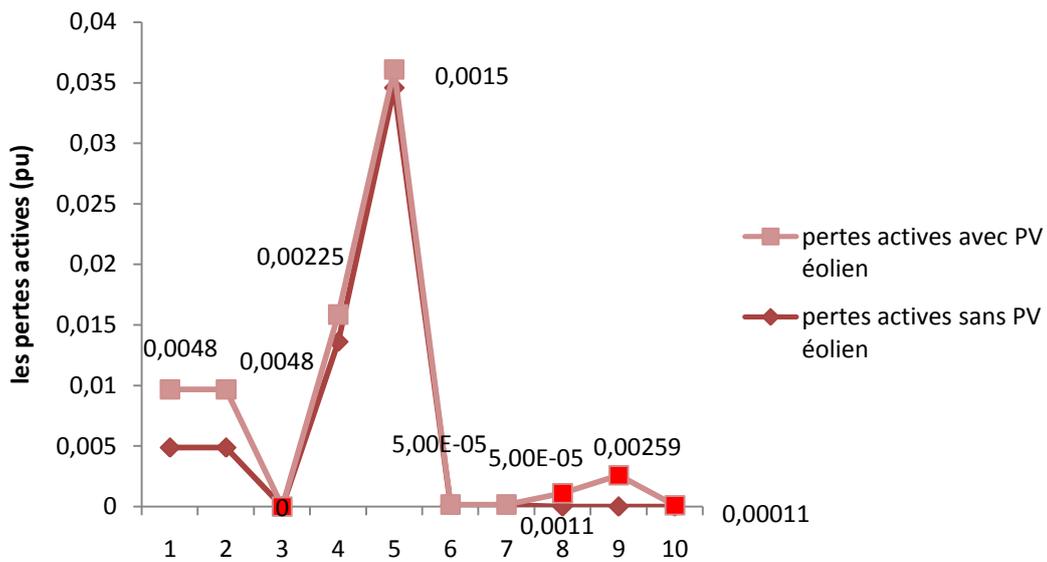


Figure (IV-13): La variation des pertes actives en (pu) avant et après l'insertion du parc éolien et PV

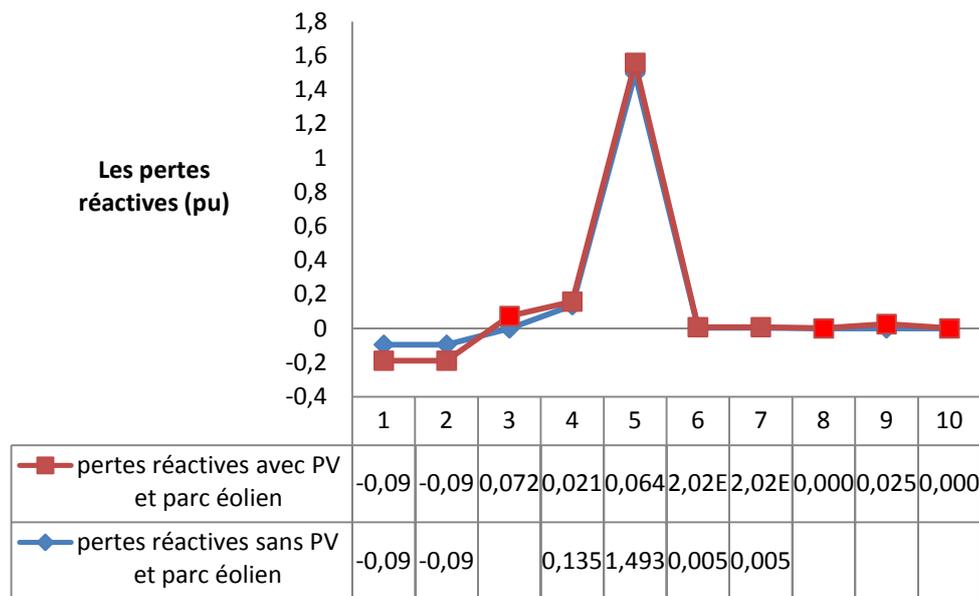


Figure (IV-14): la variation des pertes réactives en (pu) avant et après l'insertion du parc éolien et PV

La variation des pertes totales actives et réactives après l'insertion du parc éolien a Kebertene (Adrar) et des centrales photovoltaïques à Kabertene ,Adrar , In-Salah et Timimoun sont représentée dans le tableau et le graphe qui suit :

<i>Les pertes totales sans PV et parc éolien [pu]</i>		<i>Les pertes totales avec PV et parc éolien [pu]</i>	
<i>Active (pu)</i>	<i>Réactive (pu)</i>	<i>Active (pu)</i>	<i>Réactive (pu)</i>
0.05819	1.4504	0.01676	0.02692

Tableau (IV-6) : Les pertes totales en (pu) du réseau avec et sans PV et le parc éolien

- les pertes active sans PV et parc éolien
- les pertes active avec PV et parc éolien
- les pertes réactive sans PV et parc éolien
- les pertes réactive avec PV et parc éolien

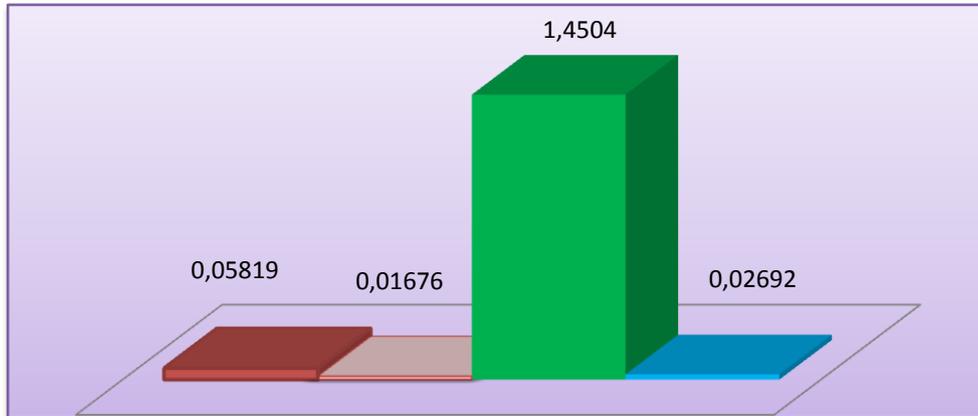


Figure (IV-15): Les pertes total en (pu) avant et après l'incorporation des sources renouvelables.

➤ Interprétation :

Après l'intégration du parc éolien dans Kabertene (Adrar) dans notre réseau réel PIAT, nous constatons qu'il y a une nette amélioration dans tout notre réseau en point de vue tension, mais les nœuds les plus affectés par cette augmentation de tension sont les nœuds 3 et 4 ; (sans l'incorporation des sources renouvelables : $V_3 = 0.6659pu$; $V_4 = 0.70893pu$ / avec l'incorporation des sources renouvelables : $V_3 = 1.0009pu$ / $V_4 = 0.9957pu$).

Le parc éolien inséré à Kabertene a permis de réduire considérablement les pertes des puissances transitées dans les différentes lignes de transmission comme le montre le tableau (IV-6).

L'intégration des énergies renouvelables comme les centrales PV à l'amélioration des tensions et à la réduction des pertes active et réactive transitées dans les différentes lignes de transmission comme le montre le tableau (IV-6).

IV.8.1 Insertion d'un parc éolien sur le réseau réel PIAT

L'intérêt de l'investissement pour la région Sud- Ouest de l'Algérie qui est installé dans Kabertene dans le but d'améliorer la qualité de l'énergie dans cette région sans perturber le réseau.

Le schéma suivant montre le placement réel de la ferme éolien de Kabertene dans le réseau PIAT

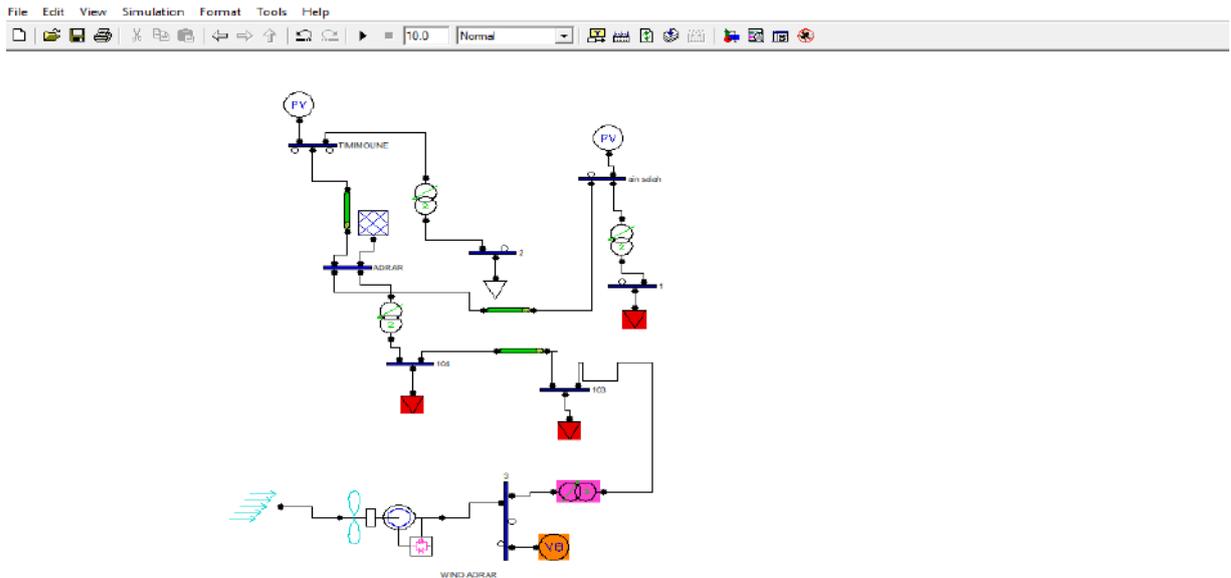


Figure (IV-16) : Schéma du réseau PIAT modifiés réalisé dans le PSAT avec intégration du parc éolien dans Kebertene

Le tableau et la figure qui suit montre la variation de la tension des nœuds avant et après l'insertion du le parc éolien de Kabertene (Adrar)

<i>Nœuds</i>	<i>Tension sans le parc éolien [pu]</i>	<i>Tension avec le parc éolien [pu]</i>
1	1.002	1.002
2	1.002	1.0007
103	0.6659	1.0011
104	0.70893	0.99605
ADRAR	1.06	1.06
TIMIMOUNE	1	1
AIN SALAH	1	1

Tableau (IV.7) : Les tensions nodales en (pu) du réseau PIAT avec et sans le parc éolien

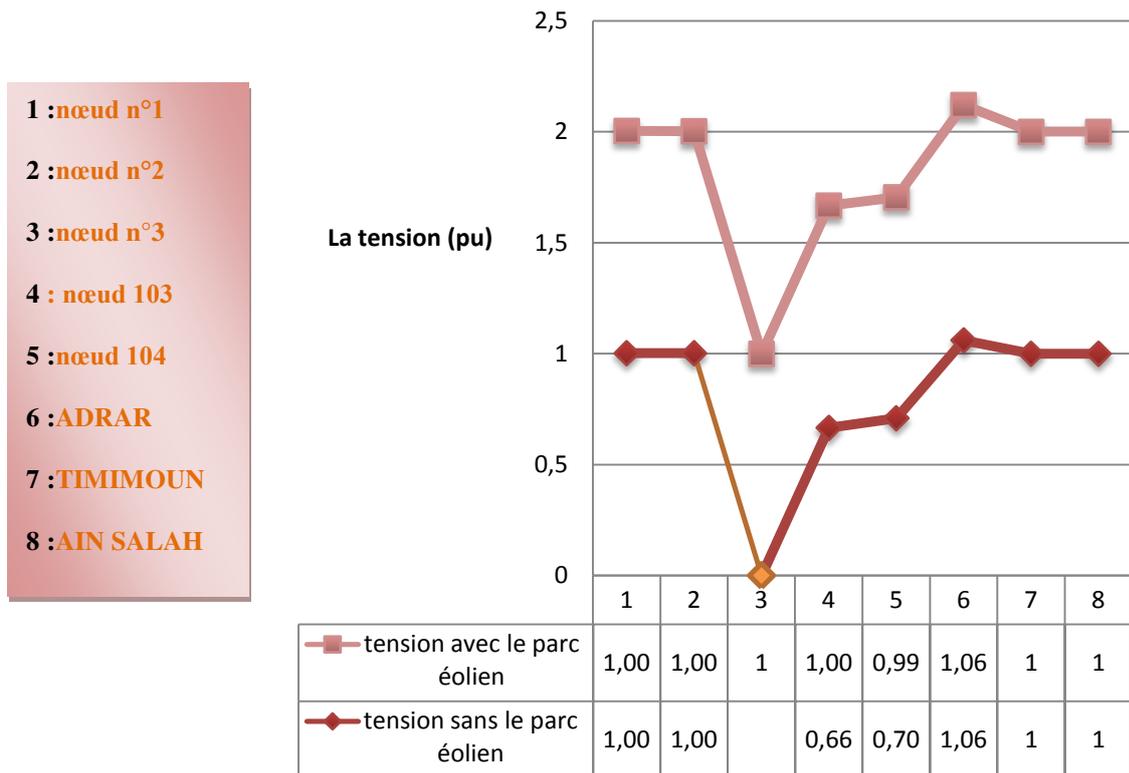


Figure (IV-17): La variation de la tension en (pu) avant et après l’insertion du parc éolien

La différence de la puissance générée avant et après l’insertion du parc éolien de Kabertene est montrée dans le tableau suivant

Les puissances	P_G sans le parc éolien [pu]	P_G avec le parc éolien [pu]
Nœud bilan	1.9642	1.0856

Tableau (IV-8) : les puissances générées en (pu) avec et sans parc éolien

La différence entre les pertes active et réactive avec et sans la ferme éolienne de Kabertene est indiquée dans le tableau suivant :

Les lignes	Les pertes actives sans parc éolien [pu]	Les pertes réactives sans parc éolien [pu]	Les pertes actives parc éolien [pu]	Les pertes réactives avec parc éolien [pu]
1	0.00487	-0.09454	0.00487	-0.09454
2	0.00487	-0.09454	0.00487	-0.09454
3	0.01361	0.013565	0.00377	0.03673
4	0.03459	1.4933	0.00182	0.07837
5	0.00012	0.00523	0.00012	0.00523
6	0.00012	0.00523	0.00012	0.00523

Tableau (IV-9): les pertes active et réactive des lignes en (pu) avec et sans le parc éolien

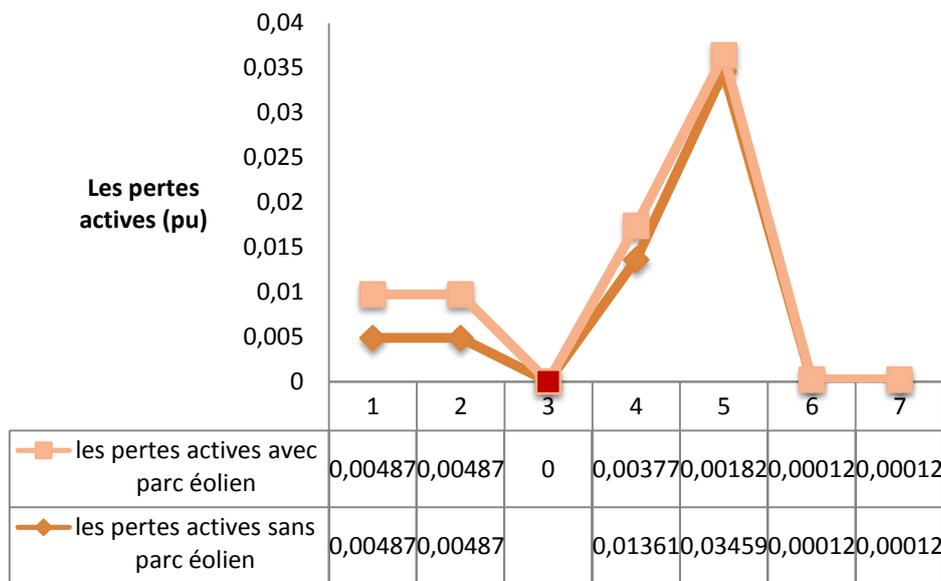


Figure (IV-18): La variation des pertes actives en (pu) après l'insertion du parc éolien

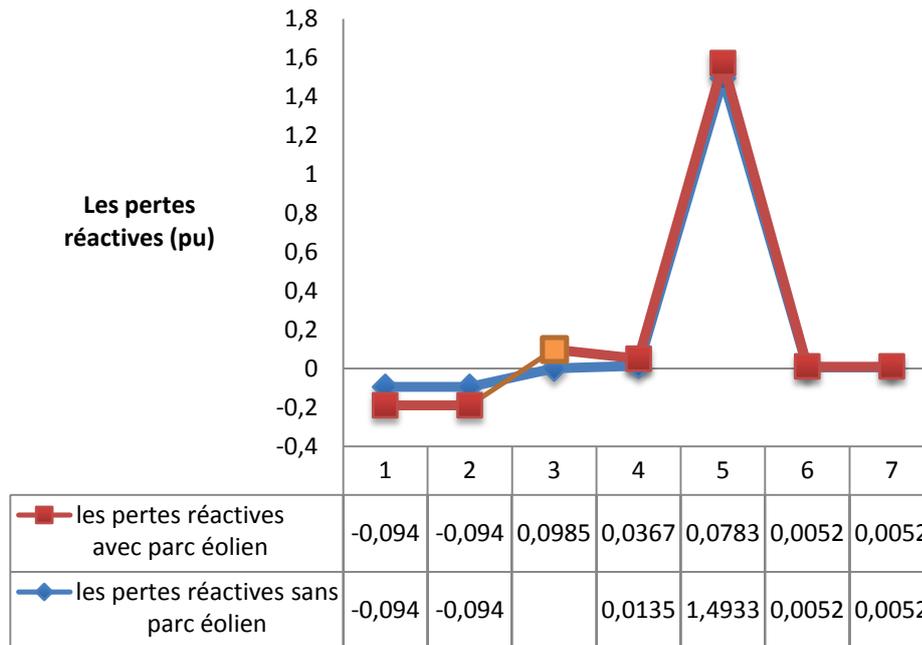


Figure (IV-19): La variation des pertes réactives en (pu) avant et après l’insertion du parc éolien

La variation des pertes totales actives et réactives après l’insertion du parc éolien de Kabertene (Adrar), est représentée dans le tableau qui suit :

<i>Les pertes totales sans PV et parc éolien</i>		<i>Les pertes totales avec PV et parc éolien</i>	
<i>Active (pu)</i>	<i>Réactive (pu)</i>	<i>Active (pu)</i>	<i>Réactive (pu)</i>
0.05819	1.4504	0.01557	0.03498

Tableau (IV.10): Les pertes totales active et réactive en (pu) avec et sans le parc éolien

➤ Interprétation des résultats

- Après l'implantation de notre parc éolien Kabertene (Adrar), nous constatons qu'il y a une nette amélioration dans tout notre réseau en point de vue tension. Les nœuds les plus affectés par cette augmentation ce sont les nœuds (3 et 4) qui sont déjà ciblés dans le Tableau (IV-8)
- La puissance active générée par le parc éolien et qui est injectée dans la région de Kabertene dans le réseau PIAT , a permis de satisfaire les besoins des différentes charges présentes dans notre réseau et aussi de soulager le nœud de référence (le nœud bilan) .parce qu' il ya une réduction dans la puissance générée après l' insertion du parc éolien , Ce dernier qui ne travaille pas à plein régime va nous donner désormais une grande marge de manœuvre et si jamais nous voulons augmenter la puissance , dans le cas d'une augmentation de la demande, de panne de générateur (centrale) la création de nouvelles charges est possible .
- L'installation du parc éolien a permis une diminution considérables des pertes transitées et consommées (active et réactive) qui s'illustre dans les différents précédents graphes et qui se traduit par une baisse des pertes actives et une diminution des pertes réactive, et qui signifie un gain énorme en qualité d'énergie et du cout \$.

Donc, l'intérêt d'intégration d'un parc éolien à Kabertene dans la wilaya d'Adrar au Sud-Ouest Algérien a pour but, de soulager le réseau de toute saturation et surtout améliorer la qualité d'énergie de ce réseau et même prouver que la centrale injectée apporte des perfectionnements.

IV.9 Réalisation du réseau réel RIN (Saida – Naama –Bechar)

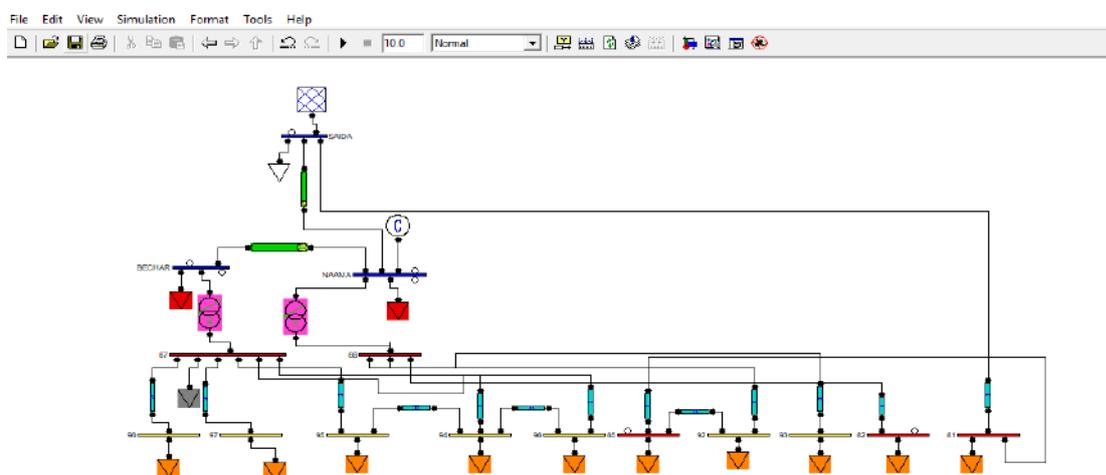


Figure (IV.20): Schéma du réseau électrique RIN dans le PSAT

Nous avons effectué plusieurs simulations avec des paramètres qui diffèrent d'un problème à un autre. Nous présentons dans les tableaux qui suivent les résultats des tensions et puissance, charge sans l'intégration des centrales PV.

<i>Nœuds</i>	<i>V [pu]</i>	<i>Phase[rad]</i>	<i>Pgen [pu]</i>	<i>Qgen [pu]</i>	<i>P_{charge} [pu]</i>	<i>Q_{charge} [pu]</i>
81	1.0359	-0.0232	0	0	0.167	0.084
82	1.0656	-0.41447	0	0	0.12	0.06
85	0.75955	-0.40344	0	0	0.15	0.07
86	1.1003	-0.38111	0	0	0	0
87	1.0112	-0.60086	0	0	0.0821	0.0383
92	0.761	-0.60334	0	0	0.26	0.08
93	1.064	-0.42155	0	0	0.07	0.03
94	1.0047	-0.60764	0	0	0.0467	0.0218
95	1.0072	-0.60498	0	0	0.0965	0.045
96	1.0045	-0.60781	0	0	0.0467	0.0218
97	0.99729	-0.62163	0	0	0.0154	0.0072
98	0.99229	-0.62222	0	0	0.028	0.0131
BECHAR	1.0404	-0.52445	0	0	0.9	0.01
NAAMA	1.07	-0.37794	0	1.0411	0.7	0.01
SAIDA	1.06	0	4.1113	0.49883	1.1	0.045

Tableau (IV-11) : Tensions et puissances obtenu en (pu) avant l'insertion des centrales PV

La production, la charge et les pertes totales des puissances actives et réactives sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

	<i>Puissance active [pu]</i>	<i>Puissance réactive [pu]</i>
<i>La production totale</i>	4.1113	1.54
<i>La charge totale</i>	3.7824	0.9412
<i>Les pertes totales</i>	0.32893	0.59876

Tableau (IV-12): La production, la charge et les pertes en (pu) totales du réseau RIN

Les puissances et les pertes actives et réactives des lignes du réseau sont dans le tableau qui suit :

Lignes	Liaison	Puissance active [pu]	Puissance réactive [pu]	Pertes active [pu]	Pertes réactive [pu]
1	87-98	0.02829	0.00981	0.00029	-0.00329
2	SAIDA-NAAMA	2.5591	-0.17247	0.19865	0.81773
3	86-93	0.07115	0.02983	0.00115	-0.00017
4	85-92	0.9079	-0.01997	0.00531	0.01465
5	81-85	0.28052	0.17975	0.03973	0.12972
6	86-82	0.1218	0.06423	0.0018	0.00423
7	SAIDA-81	0.45221	0.22129	0.00469	-0.04246
8	BECHAR-NAAMA	-1.217	-0.17562	0.04025	-0.44169
9	87-97	0.01533	0.00068	0.00013	-0.00652
10	87-95	0.113	0.05227	0.00024	0.00047
11	95 -94	0.01626	0.0068	2e-005	-0.00085
12	87-94	0.03694	0.01643	0.00013	-0.00068
13	87-96	0.04049	0.01812	0.00014	-0.00057
14	86-92	0.21018	0.2109	0.3566	-0.9628
15	94-96	0.00636	0.00296	0	-0.00015
16	BECHAR-87	0.31704	0.16562	0.0007	0.03
17	NAAMA-86	0.40318	0.307	4e-005	0.00205

Tableau (IV-13): Les puissances transitées en (pu) dans le réseau RIN

➤ Interprétation des résultats

Le calcul de l'écoulement de puissances par la méthode de Newton-Raphson nous a donné les résultats suivants :

- Nous avons une baisse de tension dans les nœuds 92, 97, 98 et une plus faible tension dans le nœud 85 avec une valeur de 0.75955 pu.
- Les puissances actives et réactives transitées des lignes
 - ligne N° 15 : nœuds (94-96),
 - ligne N° 9: nœuds (87-97)

sont faibles par rapport aux autres lignes

- nous remarquons que le réseau souffre d'un problème de pertes actives et réactives au niveau des lignes suivantes:
 - ligne N° 2 : nœuds (SAIDA-NAAMA),
 - ligne N° 5: nœuds (81-85) ,
 - ligne N° 8: nœuds (BECHAR-NAAMA),
 - ligne N° 14: nœuds (86-92) ,

IV.9.1 Intégration des centrales photovoltaïques dans le réseau réel RIN

Le schéma suivant montre le placement de la centrale PV sur le réseau RIN (Saida - Naama)

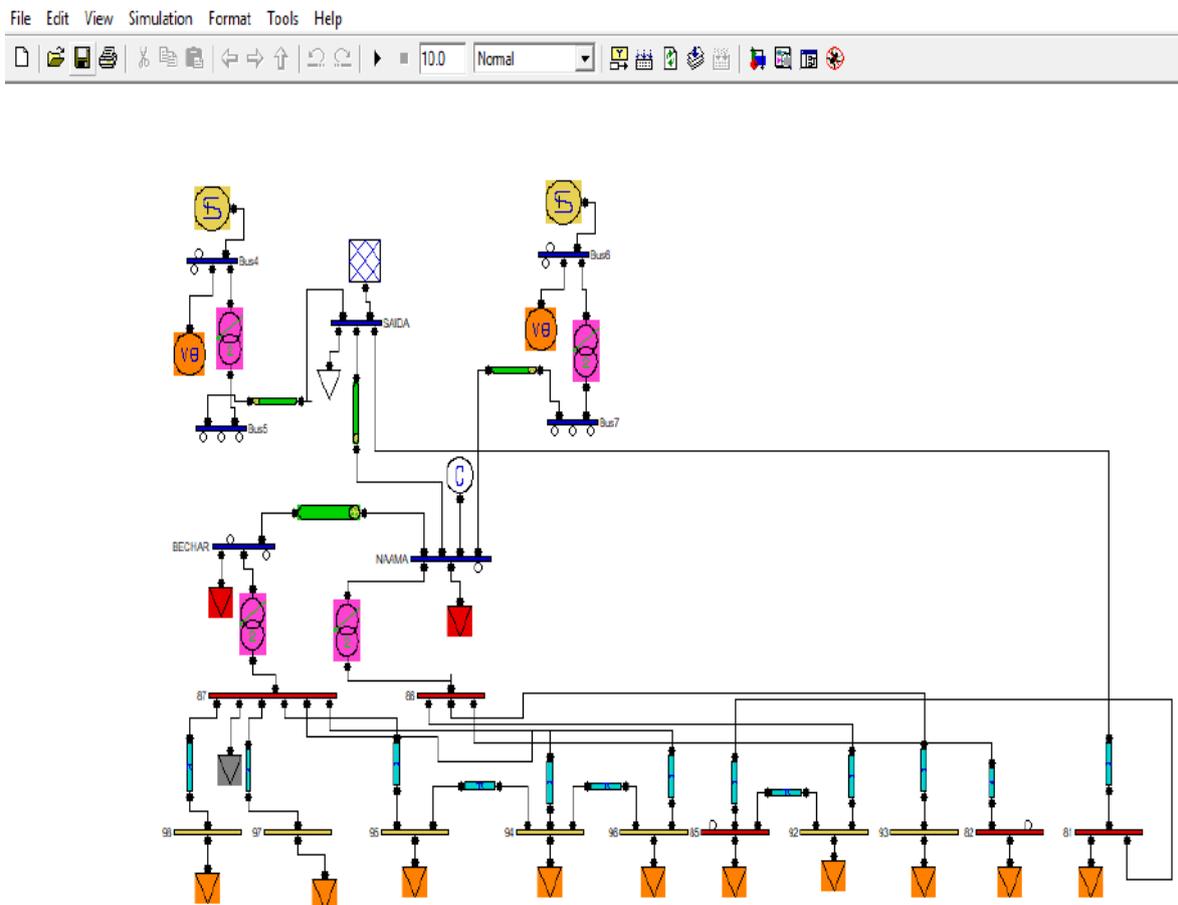


Figure (IV.21): Schéma du réseau électrique après l'intégration des centrales PV dans les wilayas de Saida et Naama

Le tableau et le graphe qui suivent nous indiquent la variation de la tension avant et après l'insertion de la centrale PV

Nœuds	Tension sans les centrales PV [pu]	Tension avec les centrales PV [pu]
81	1.0359	1.0391
82	1.0656	1.0658
85	0.75955	0.79727
86	1.1003	1.1005
87	1.0112	1.0112
92	0.761	0.77799
93	1.064	1.0642
94	1.0047	1.0047
95	1.0072	1.0072
96	1.0045	1.0045
97	0.99729	0.99971
98	0.99229	1.0007
BECHAR	1.0404	1.0404
NAAMA	1.07	1.082
SAIDA	1.06	1.065

Tableau (IV-14): Les tensions nodales en (pu) du réseau électrique RIN avec et sans PV

- 1 : nœud 81
- 2 : nœud 82
- 3 : nœud 85
- 4 : nœud 86
- 5 : nœud 87
- 6 : nœud 92
- 7 : nœud 93
- 8 : nœud 94
- 9 : nœud 95
- 10 : nœud 96
- 11 : nœud 97
- 12 : nœud 98
- 13 : BECHAR
- 14 : NAAMA
- 15 : SAIDA
- 16 : bus 4
- 17 : bus 5
- 18 : bus 6
- 19 : bus 7
- 20 : bus 18
- 21 : bus 19

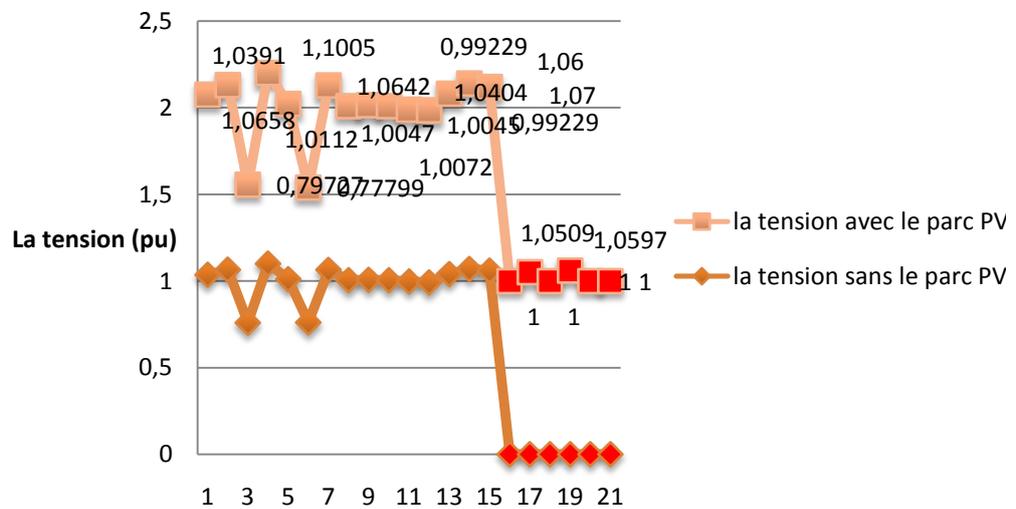


Figure (IV-22): La variation de la tension nodales en (pu) avant et après l'insertion du PV

La variation des pertes totales actives et réactives après l'insertion du PV est représentée dans le tableau qui suit :

<i>Les pertes totales sans PV</i>		<i>Les pertes totales avec PV</i>	
<i>Active (pu)</i>	<i>Réactive (pu)</i>	<i>Active (pu)</i>	<i>Réactive (pu)</i>
0.32893	0.59876	0.12999	-0.09554

Tableau (IV-15): Les pertes totales en (pu) du réseau RIN

La différence de la puissance générée du nœud bilan avant et après l'insertion des centrales photovoltaïques est montrée dans le tableau suivant :

<i>Les puissances</i>	<i>P_G sans les centrale PV</i>	<i>P_G avec les centrale PV</i>
<i>Nœud bilan</i>	4.1113	3.9124

Tableau (IV-16) : Les puissances générées en (pu) avec et sans PV

Les puissances et les pertes actives et réactives des lignes du réseau avant et après l'insertion du PV sont dans le tableau qui suit :

<i>Lignes</i>	<i>Les pertes actives sans PV</i>	<i>Les pertes réactives sans PV</i>	<i>Les pertes actives avec PV</i>	<i>Les pertes réactives avec PV</i>
1	0.00029	-0.00329	0.00029	-0.00329
2	0.19865	0.81773	0.00773	-0.09198
3	0.00115	-0.00017	0.00115	-0.00017
4	0.00531	0.01465	0.00115	-0.00053
5	0.03973	0.12972	0.02552	-0.08133
6	0.0018	0.00423	0.0018	-0.00423
7	0.00469	-0.04246	0.00352	-0.04664
8	0.04025	-0.44169	0.04025	-0.44169
9	0.00013	-0.00652	0.00013	-0.00652
10	0.00024	0.00047	0.00024	-0.00047
11	2e-005	-0.00085	2e-005	-0.00085
12	0.00013	-0.00068	0.00013	-0.00068
13	0.00014	-0.00057	0.00014	-0.00057
14	0.3566	-0.9628	0.04179	-0.1136
15	0	-0.00015	0	-0.00015
16	0.0007	0.03	0.0007	-0.03
17	4e-005	0.00205	5e-005	-0.00229

Tableau (IV-17): Les puissances transitées et les pertes en (pu) dans le réseau électrique RIN

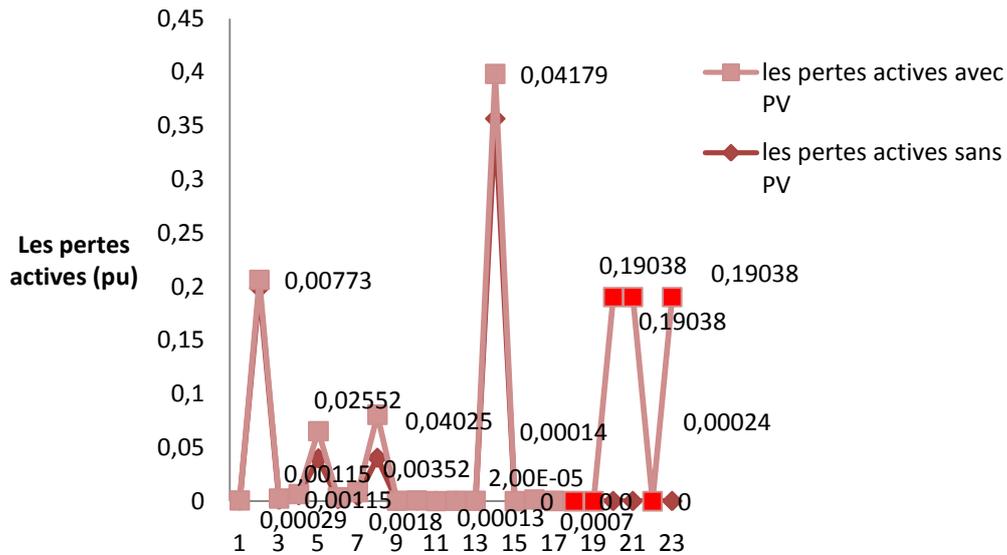


Figure (IV-23): La variation des pertes actives en (pu) sans et avec l'insertion de PV

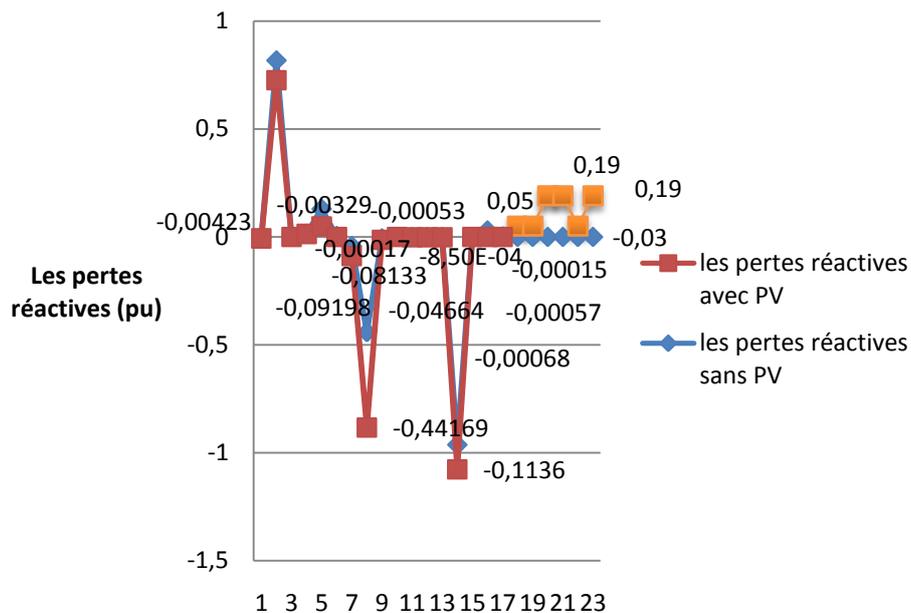


Figure (IV-24): La variation des pertes réactives en (pu) avant et après l'insertion du PV

➤ **Interprétation des résultats**

- Nous pouvons constater qu'il y a une diminution de la puissance générée pour le nœud bilan, mais cette diminution a une influence positive sur notre réseau, car une diminution de la puissance de production signifie un gain économique point de vue coût.

- Après l’incorporation des centrales photovoltaïques dans notre réseau RIN , nous constatons qu’il y a une amélioration des tensions qui sont ciblées dans le tableau (IV.14)
- Nous remarquons aussi une baisse des pertes actives et réactives dans la plupart des lignes du réseau.

IV .10 Réalisation du réseau réel RIN (Saida – Naama –Bechar) et le réseau réel PIAT dans le PSAT

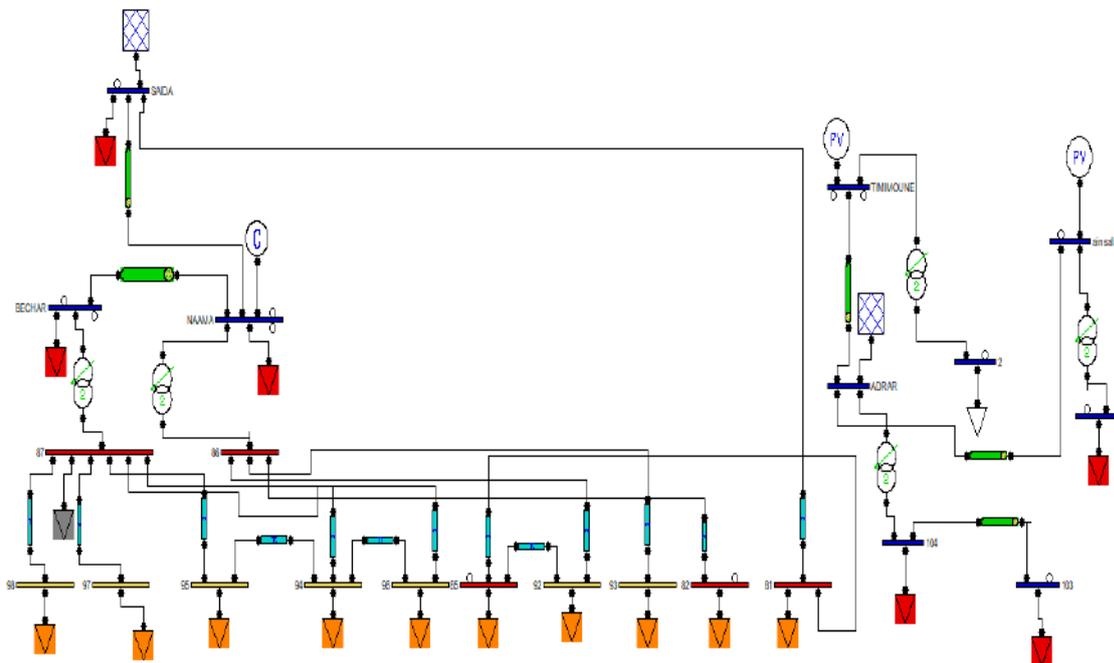


Figure (IV-25) : Schéma du réseau électrique RIN et le réseau PIAT dans le PSAT

Nous avons effectué plusieurs cas de simulation. Nous présentons dans les tableaux qui suivent les résultats de La production, la charge et les pertes totales des puissances actives et réactives sont indiqués :

	<i>Puissance active [pu]</i>	<i>Puissance réactive [pu]</i>
<i>La production totale</i>	7.0755	3.3634
<i>La charge totale</i>	6.2594	1.4275
<i>Les pertes totales</i>	0.38712	2.0491

Tableau (IV-18): La production, la charge et les pertes totales du réseau interconnecté (PIAT-RIN)

Le tableau qui suit, nous indique la variation de la tension des nœuds du réseau RIN et PIAT

<i>Nœuds</i>	<i>V</i> [pu]	<i>Phase</i> [rad]	<i>P_{gen}</i> [pu]	<i>Q_{gen}</i> [pu]	<i>P_{charge}</i> [pu]	<i>Q_{charge}</i> [pu]
1	0.99002	-0.04313	0	0	0.14003	0.02544
103	0.6659	-0.074826	0	0	0.76213	0.15104
104	0.70893	-0.589335	0	0	0.8638	0.17119
2	0.9687	-0.04313	0	0	0.14003	0.02512
81	1.0391	-0.0232	0	0	0.167	0.084
82	1.0658	-0.41447	0	0	0.12	0.06
85	0.75955	-0.40344	0	0	0.15	0.07
86	1.1003	-0.38111	0	0	0	0
87	0.7578	-0.60086	0	0	0.0821	0.0383
92	0.761	-0.60334	0	0	0.26	0.08
93	1.064	-0.42155	0	0	0.07	0.03
94	1.0047	-0.60764	0	0	0.0467	0.0218
95	1.002	-0.60498	0	0	0.0965	0.045
96	0.76591	-0.60781	0	0	0.0467	0.0218
97	0.997268	-0.62222	1.9442	2.6174	0.0154	0.0072
98	0.97769	0	0	0	0.028	0.0131
ADRAR	1.06	-0.52445	0	0	0	0
BECHAR	1.00404	-0.37794	0	0	0.9	0.01
NAAMA	1.07	-0.37794	0	1.0411	0.07	0.01
SAIDA	1.06	0	4.1113	0.49883	1.1	0.45
TIMIMOUNE	1	-0.00744	0.01	-0.39695	0	0
AIN SALAH	1	-0.00744	0.01	-0.39695	0	0

Tableau (IV.19) : Tensions obtenu en (pu) réseau entre (PIAT et RIN)

Le tableau qui suit représente les puissances actives et réactives transitées entre les lignes et les pertes actives et réactives ci desous

<i>Lignes</i>	<i>Liaison k-m</i>	<i>Puissance active [pu]</i>	<i>Puissance réactive [pu]</i>	<i>Pertes active [pu]</i>	<i>Pertes réactive [pu]</i>
1	87-98	0.0283	0.00982	0.0029	-0.00329
2	SAIDA-NAAMA	2.5591	-0.17247	1.9865	-0.81773
3	86-93	0.07115	0.02983	0.00115	-0.00017
4	85-92	0.09079	0.01997	0.00531	0.001465
5	81-85	0.28052	0.17975	0.03937	0.12972
6	86-82	0.1218	0.06423	0.0018	0.00423
7	TIMIMOUNE-ADRAR	-0.13015	-0.42762	0.00487	-0.09454
8	SAIDA-81	0.45221	0.22129	0.0469	-0.42146
9	ADRAR-AIN SALAH	0.13503	0.33308	0.00487	-0.09454
10	BECHAR-NAAMA	-1.217	-0.17562	0.04025	-0.44169
11	87-97	0.01553	0.00089	0.00013	-0.00652
12	87-95	0.113	0.05232	0.0024	0.00047
13	95 -94	0.01626	0.0068	2 ^e -005	-0.00068
14	87-94	0.03694	0.01643	0.00013	-0.9638
15	87-96	0.04049	0.01812	0.00014	-0.0015
16	86-92	0.21018	0.2109	0.3566	0.00679
17	94-96	0.00636	0.00296	0	-0.00205
18	BECHAR-87	0.31704	0.16701	0.0007	0.933
19	NAAMA-86	0.40318	0.307	4 ^e -005	1.933
20	ADRAR-104	1.6741	1.9562	0.03459	0.00398
21	AIN SALAH-1	0.14015	0.03066	0.00012	0.00523
22	104-103	0.77574	0.28669	0.01361	0.13565
23	TIMIMOUNE - 2	0.14015	0.03066	0.00123	0.00723

Tableau (IV-20): Les puissances transitées en (pu) dans le réseau électrique interconnecté (RIN-PIAT)

➤ Interprétation des résultats

Le calcul de l'écoulement de puissances par la méthode de Newton-Raphson nous a donné les résultats suivants :

- Nous avons une baisse de tension dans les nœuds ,104,87 , 94,96 respectivement (0.70893, 0.7578 , 0.761 ,0.76591 (pu)) ; nous observons la plus faible tension dans le nœud 103 avec une valeur de 0.6659 pu.
- Les puissances actives et réactives transitées des lignes
 - ligne N° 7 : nœuds (Timimoune-Adrar)
 - ligne N° 11: nœuds (87-97)
 - ligne N° 17: nœuds (94-96)
 - ligne N° 9: nœuds (ADRAR-AIN SALAH)

sont faibles par rapport aux autres lignes

- Nous remarquons que le réseau souffre d'un problème de pertes actives et réactives au niveau des lignes suivantes:
 - ligne N° 2 : nœuds (SAIDA-NAAMA),
 - ligne N° 5: nœuds (81-85),
 - ligne N° 19 : nœuds (NAAMA-86),
 - ligne N° 22: nœuds (104-103),

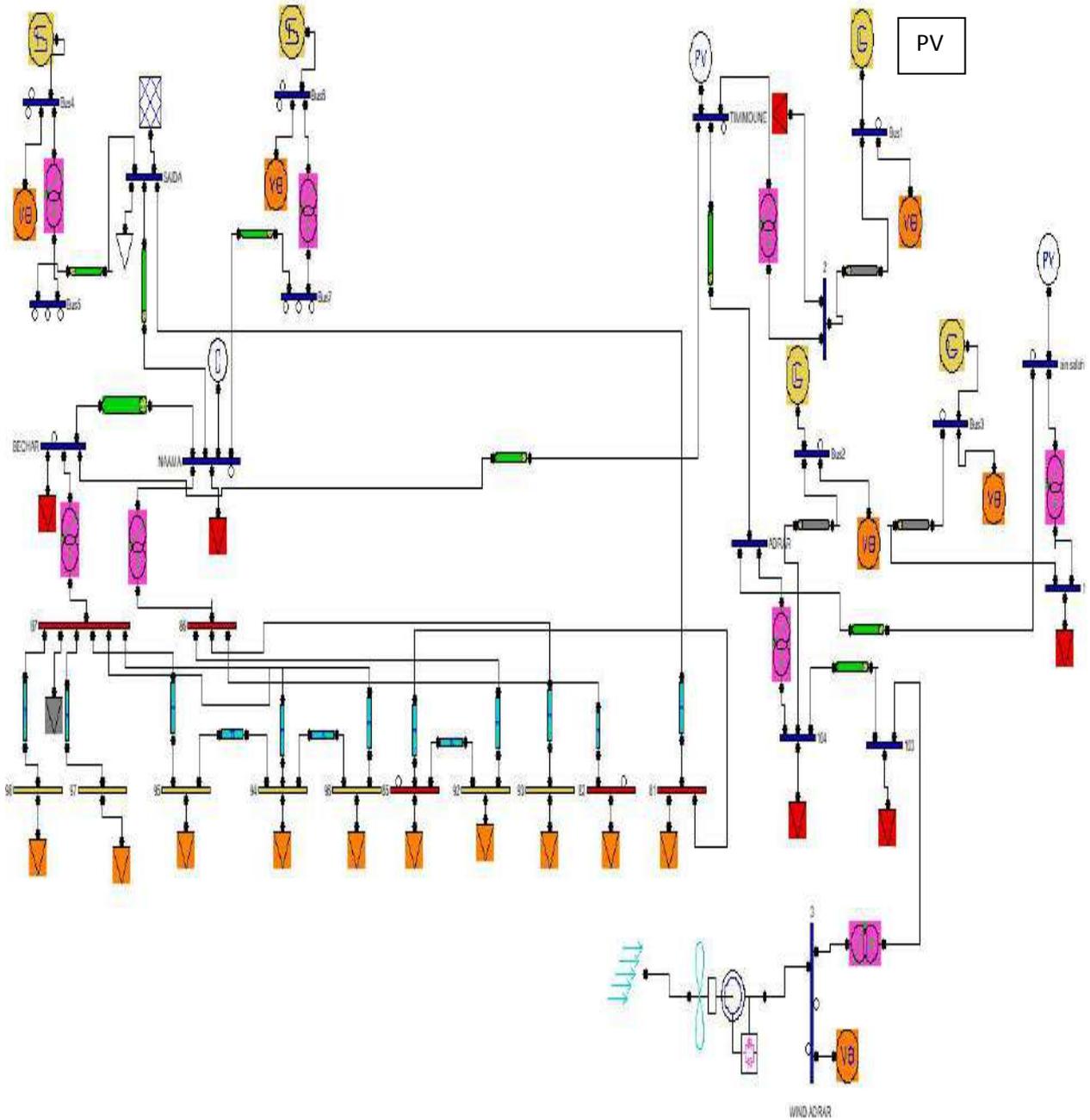
IV.11 Deuxième solution proposée

Puisque nous avons un problème important de transit de puissance dans le réseau PIAT qui affecte la stabilité de la tension, et qui influe sur l'augmentation des pertes dans ce même réseau .Pour cela, la solution proposée s'oriente vers l'utilisation d'une liaison électrique entre Bechar et Timimoune

En outre, pour bénéficier des conditions climatiques météorologiques solaires et la vitesse du vent au niveau de cette région comme, Bechar et Adrar.

Puisque Adrar n'étant pas raccordée au réseau Ouest Algérie et se trouvant à 650 km de Bechar le point le plus proche de ce réseau, nous utiliserons une connexion électrique pour bénéficier du parc éolien existant à Kabertene (Adrar) et raccorder Adrar au réseau RIN (Ouest Algérien) ; par l'utilisation d'une connexion entre Bechar et Timimoun , voir figure (IV.26)

File Edit View Simulation Format Tools Help



Le tableau qui suit représente les puissances actives et réactives transitées entre les lignes et les pertes actives et réactives dans le tableau suivant :

Lignes	Liaison <i>k-m</i>	Puissance active [pu]	Puissance réactive [pu]	Pertes active [pu]	Pertes réactive [pu]
1	87-98	0.0283	0.00996	0.0003	-0.00314
2	SAIDA- NAAMA	0.43105	-0.20447	0.00623	-0.09913
3	86-93	0.07115	0.02983	0.00115	-0.00017
4	85-92	0.044	0.00022	0.00109	0.00032
5	81-85	0.21926	0.15067	0.02526	0.08045
6	86-82	0.1218	0.06423	0.0018	0.00423
7	TIMIMOUNE- ADRAR	-0.08446	-0.02792	0.00025	-0.10968
8	SAIDA-81	0.38975	0.18795	0.0035	-0.04672
9	BECHAR- TIMIMOUNE	-0.24205	0.18325	0.00348	-0.0974
10	ADRAR-AIN SALAH	-0.10973	-0.04083	0.00039	-0.10902
11	BECHAR- NAAMA	-0.97504	-0.36026	0.02635	-0.49635
12	87-97	0.01554	0.00089	0.00014	-0.00631
13	87-95	0.113	0.05232	0.00024	0.0005
14	95 -94	0.01626	0.00683	2 ^e -005	-0.00082
15	87-94	0.03695	0.01647	0.00013	-0.00064
16	87-96	0.04049	0.01816	0.00015	-0.00053
17	86-92	0.25918	0.19467	0.04209	0.11456
18	94-96	0.00636	0.00296	0	-0.00015
19	BECHAR-87	0.31709	0.16701	0.00072	0.03091
20	NAAMA-86	0.45219	0.29102	5 ^e -005	0.00231
21	ADRAR-104	0.02502	0.12258	9 ^e -005	0.00398
22	AIN SALAH-1	-0.10011	0.05375	8 ^e -005	0.00328
23	104-103	-0.69566	-0.0946	0.00516	0.05065
24	TIMIMOUNE -2	-0.15107	0.06241	0.00016	0.00678

Tableau (IV-21): Les puissances transitées en (pu) dans le réseau électrique interconnecté (RIN-PIAT)

La production, la charge et les pertes totales des puissances actives et réactives sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

	<i>Puissance active [pu]</i>	<i>Puissance réactive [pu]</i>
<i>La production totale</i>	6.3929	1.2008
<i>La charge totale</i>	6.2594	1.4275
<i>Les pertes totales</i>	0.13348	-0.22675

Tableau (IV-22): La production, la charge et les pertes totales du réseau interconnecté (PIAT-RIN)

Le tableau et le graphe qui suivent nous indique la variation de la tension avant et après l'insertion de la centrale PV

<i>Nœuds</i>	<i>Tension sans la connexion électrique, les centrales PV et le parc éolien[pu]</i>	<i>Tension avec la connexion électrique, les centrales PV et le parc éolien[pu]</i>
1	0.99002	0.99725
103	0.6659	0.99631
104	0.70893	0.97708
2	0.9687	0.99576
81	1.0391	1.0391
82	1.0658	1.0658
85	0.75955	0.79768
86	1.1003	1.1005
87	0.7578	0.99698
92	0.761	0.77786
93	1.064	1.0642
94	1.0047	0.99033
95	1.002	0.99289
96	0.76591	0.99016
97	0.997268	0.98268
98	0.97769	0.97769
ADRAR	1.06	0.9986
BECHAR	1.00404	1.0271
NAAMA	1.07	1.07
SAIDA	1.06	1.06
TIMIMOUNE	1	1
ADRAR	1	1

Tableau (IV23) :Les tensions obtenu en (pu) avant et après la liaison électrique et l'intégration du PV et le parc éolien de notre réseau entre (PIAT et RIN)

Les puissances et les pertes actives et réactives des lignes du réseau avant et après l'insertion du PV sont dans le tableau qui suit :

<i>Lignes</i>	<i>Les pertes actives sans la liaison électrique, PV et le parc éolien en [pu]</i>	<i>Les pertes réactives sans la liaison électrique, PV et le parc éolien [pu]</i>	<i>Les pertes actives avec la liaison électrique, PV et le parc éolien [pu]</i>	<i>Les pertes réactives avec la liaison électrique, PV et le parc éolien [pu]</i>
1	0.0029	-0.00329	0.0003	-0.00314
2	1.9865	-0.81773	0.00623	-0.09913
3	0.00115	-0.00017	0.00115	-0.00017
4	0.00531	0.001465	0.00109	0.00032
5	0.03937	0.12972	0.02526	0.08045
6	0.0018	0.00423	0.0018	0.00423
7	0.00487	-0.09454	0.00025	-0.10968
8	0.0469	-0.42146	0.0035	-0.04672
9	0.00487	-0.09454	0.00348	-0.0974
10	0.04025	-0.44169	0.00039	-0.10902
11	0.00013	-0.00652	0.00014	-0.00631
12	0.0024	0.00047	0.00024	0.0005
13	2 ^e -005	-0.00068	2 ^e -005	-0.00082
14	0.00013	-0.9638	0.00013	-0.00064
15	0.00014	-0.0015	0.00015	-0.00053
16	0.3566	0.00679	0.04209	0.11456
17	0	-0.00205	0	-0.00015
18	0.0007	0.933	0.00072	0.03091
19	4 ^e -005	1.933	5 ^e -005	0.00231
20	0.03459	0.00398	9 ^e -005	0.00398
21	0.00012	0.00523	8 ^e -005	0.00328
22	0.01361	0.13565	0.00516	0.05065
23	0.00123	0.00723	0.00016	0.00678

Tableau (IV-24): les pertes active et réactive en (pu) avant et après la liaison électrique , et l'insertion du PV et le parc éolien dans le réseau électrique RIN et PIAT

La différence de la puissance générée du nœud bilan avant et après l'insertion des centrales photovoltaïques est montrée dans le tableau suivant :

<i>Les puissances</i>	<i>P_G sans la liaison électrique, PV et le parc éolien en [pu]</i>	<i>P_G avec la liaison électrique, PV et le parc éolien en [pu]</i>
<i>Nœud bilan</i>	7.0755	6.3929

Tableau (IV-25) : Les puissances générées en (pu) avec et sans PV

➤ **Interprétation des résultats :**

- Nous constatons qu'il y a une nette amélioration dans tout notre réseau interconnecté point de vue tension (réseau PIAT et une partie du réseau RIN Saida Naama et Bechar)
- Nous remarquons aussi une baisse des pertes actives et réactives dans la plupart des lignes
- il y a une diminution de production de la puissance générée cela dans le but de compenser les pertes des lignes et les chutes de tension des nœuds de charge lointains.
- Grace aussi à l'intégration des parcs éoliens de Kabertene et les champs photovoltaïques dans le réseau aux points d'Adrar, Saida et Naama , Timimoun il y a eu une amélioration du réseau sans perturbations.

La connexion entre Bechar – Timimoun au réseau Ouest d'Algérie en utilisant une connexion électrique a été effectuée pour deux raisons nous avons bénéficié de son excellent potentiel éolien comme premier point en deuxième point comme le réseau PIAT est un réseau isolé du réseau national , la connexion le rend plus fiable et sécurisé .

IV.12 Réalisation de la maquette représentative

Le réseau « PIAT » est le pôle d'IN- SALAH, ADRAR et TIMIMOUN, ce réseau assure la connexion d'In-Salah à Timimoun en passant par Aoulef par des lignes 220 kV, il est alimenté par les centrales d'Adrar, In- Salah, Kabertene, Timimoun et Zaouiet-Kounta, ainsi que des centrales PV et une ferme éolienne de 10 MW

IV. 12.1 Consistante électrique du réseau PIAT

La consistante électrique du système du pôle InSalah/Adrar/Timimoun , peut se décomposer :

- ❖ Unités thermiques de production (conventionnelles);
- ❖ Installations de production renouvelables;
- ❖ Lignes de transport;
- ❖ Postes de transformations THT/MT

L'étude de l'interconnexion du réseau Adrar- In Salah- Timimoune (PIAT) avec l'intégration des Energies renouvelables est réalisée dans le but d'examiner la faisabilité d'une interconnexion entre les réseaux PIAT en tenant compte du programme national de développement des énergies renouvelables. Toutes les analyses développées dans le cadre du Projet «Réalisation d'une étude d'interconnexion du réseau Adrar - In Salah avec l'intégration des énergies renouvelables» ont montré que l'interconnexion PIAT pose des défis techniques importants, notamment à cause de la longueur à couvrir et de la faiblesse du réseau PIAT, caractérisé par une charge et une inertie très réduites. Cependant, les analyses techniques déployées dans plusieurs conditions de charge pour considérer les conditions les plus contraignantes, ont montré que l'interconnexion est faisable et permet le développement massif d'énergie EnR dans le réseau PIAT.

Nous avons réalisé une maquette à échelle réduite du réseau PIAT dans notre projet de fin d'étude sur ' l'intégration de parc éolien au Sud Ouest Algérien' ; laquelle maquette que nous avons voulu représenté et fidèle dans ses proportions au réseau PIAT réel , malgré le manque de moyens et de matériel et surtout à cause de COVID19 et autre confinement pour faire un travail parfait .



Figure (IV.27) : La maquette représentative

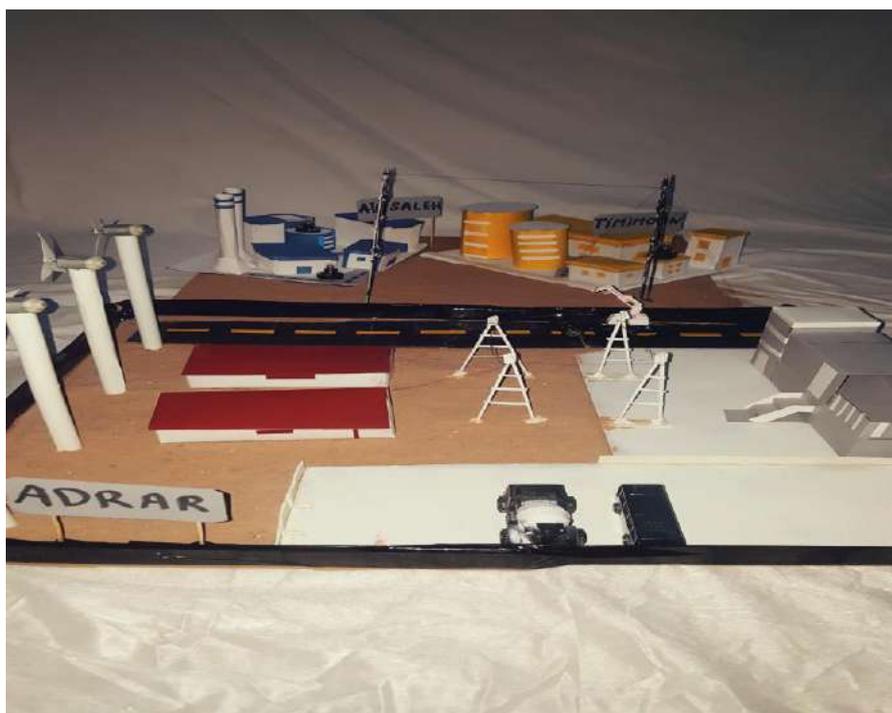


Figure (IV.28) : Le réseau PIAT avant l'alimentation



Figure (IV.29) : le réseau interconnecté PIAT avant l'alimentation



Figure (IV.30) : les deux régions In-Salah et Timimoune avant l'alimentation



Figure (IV.31) : La région Adrar avant l'alimentation



Figure (IV. 32) : La maquette représente le réseau PIAT



Figure (IV.33) : La région In Salah avant l'alimentation



Figure (IV.34) : La région Timimoune avant l'alimentation



Figure (IV.35) : La région Timimoune après l'alimentation



Figure (IV.36) : La région Adrar après l'alimentation



Figure (IV.37) : La maquette représente le réseau PIAT après l'alimentation



Figure (IV.38) : La région In Salah après l'alimentation

IV.13 Conclusion

Dans ce chapitre l'étude du parc éolien de Kabertene Adrar (site que nous avons d'ailleurs constitué sur une maquette représentative) a donné un résultat satisfaisant, surtout après l'insertion de sa production décentralisée dans les réseaux de transport et de distribution qui a résolu un certain nombre de problèmes et autres contraintes ; d'où nous pouvons conclure que le parc éolien est un projet très efficace et positif pour la compensation des pertes de l'énergie réactive.

La connexion du département d'Adrar (PIAT) au réseau (RIN) en utilisant une liaison électrique a été effectuée pour deux raisons : Premièrement, cette région était isolée, deuxièmement, nous avons bénéficié de son excellent potentiel éolien.

Dans ce chapitre, les composants proposés du système sont mis en application dans des environnements de logiciel PSAT/MATLAB. Les composants et les paramètres électriques de ce réseau sont étudiés, à l'aide des outils de ce logiciel, montrant les résultats obtenus dans chaque ligne.

Il faut souligner que toutes les données réelles concernant l'année 2017 nous ont été transmises par des gens de terrain encore opérationnels à ce jour que ce soit à la ferme éolienne de Kabertene (Adrar) ou le centre photovoltaïque de Ain Skhouna (Saida) .

Conclusion

Générale

Conclusion Générale

La croissance de la demande sur l'énergie électrique, a été toujours en évolution et une nécessité permanente des clients, qui rencontrent souvent en face l'incapacité des producteurs d'électricité à satisfaire cette exigence, d'une part.

D'autre part l'impact environnemental des centrales électriques à base des fossiles qui se caractérise par le dégagement de la pollution et le réchauffement de la planète. Ces raisons ont incité les producteurs d'électricité à trouver une autre solution alternative qui est l'utilisation des EnR pour satisfaire le besoin tant en qualité qu'en quantité.

Les énergies renouvelables sont propres et constituent une solution alternative pour subvenir aux besoins de la société actuelle. Longtemps négligées ces énergies reprennent la place qui leurs est dû, grâce aux recherches et études qui se font de plus en plus diversifiées et pluridisciplinaires

La production d'énergie renouvelable, notamment celle de type éolien, se distingue par son caractère aléatoire et intermittent, ainsi que de la qualité de l'énergie fournie. Les travaux présentés dans ce mémoire concernent l'intérêt d'intégration d'un parc éolien au Sud-Ouest de l'Algérie, sachant qu'elle dispose d'un potentiel énergétique importants au niveau mondial.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les types des énergies renouvelables qui existent dans le monde et leur évolution dans le temps . Beaucoup de pays se sont fixés des objectifs stratégiques ambitieux et ont lancé des programmes intégrés d'envergure dont les bénéfices attendus portent sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la diversification économique, la création d'emplois directs et indirect, le développement industriel local et l'amélioration du capital humain. Les énergies renouvelables offrent aussi l'occasion de desservir les régions isolées et très éloignées du réseau électrique national et d'améliorer ainsi l'accès des populations, notamment les plus pauvres, à l'énergie. Dans cette optique, une politique et une stratégie internationale a été développée, et adoptée par plusieurs pays du monde dont l'Algérie, tend à l'utilisation des EnR dans la production d'électricité et leurs intégrations dans les réseaux électriques d'une manière rentable et optimale.

Reconnaissant l'importance de ces énergies, le ministère de l'énergie et des mines Algérien a lancé un ambitieux programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique. Le programme s'est fixé comme objectif principal de produire d'ici 2030, 40% d'électricité à partir de ressources renouvelables.

Le deuxième chapitre est une étude de la stratégie de développement des énergies renouvelables en Algérie à travers une analyse du programme nationale des énergies renouvelables et efficacité énergétique

Dans le troisième chapitre, un état de l'art des méthodes de résolution de l'écoulement de puissance ; le problème de l'écoulement de puissance., les causes qui la favorisent et les problèmes de réseau électrique en général 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 électriques intégrant des énergies renouvelables. Nous présentons pourquoi nous avons décidé d'utiliser ce logiciel. Nous avons aussi identifié les opérations et les méthodes de cet outil de simulation

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude du réseau Algérien RIN (réseau interconnecté du nord) et le réseau PIAT (In Salah-Timimoune-Adrar) avec l'intégration des énergies renouvelables, plus particulièrement le générateur éolien. Afin de traiter les problèmes du réseau, nous avons effectué des études dans plusieurs sites différents. Le choix de l'emplacement de la ferme éolienne est conditionné par les conditions climatiques du site et les résultats du calcul de l'écoulement de puissance. Selon les résultats obtenus, le site idéal pour la ferme d'éolienne est au niveau de la région d'Adrar. Selon l'étude du flux de puissance du réseau Algérien avec l'insertion de l'énergie solaire photovoltaïque. La résolution des problèmes de l'écoulement de puissance nous a permis de conclure que l'utilisation des énergies renouvelables présente des avantages significatifs pour réduire les pertes de puissance et améliorer le profil de tension

Le PSAT étant le logiciel utilisé dans cette étude ; la simulation du réseau réel le PIAT (In Salah-Timimoune-Adrar) et le réseau RIN (réseau interconnecté du nord) étant aussi faite avant et après l'insertion des sources renouvelables (le parc éolien et centrale PV) dont nous avons procédé à une connexion entre Bechar –Timimoune pour raccorder Adrar au réseau Ouest Algérie, rendre le réseau flexible, grâce à l'intégration et la connexion électrique ; et le tout nous l'avons renforcé par la réalisation d'une maquette explicite et représentative du modèle réel .

En perspectives. Les ressources illimitées et disponibles, les énergies renouvelable représentent une chance pour plus de deux milliards et demie de personnes dans le monde en particulier dans les pays du tiers monde et les habitants des régions isolées, d'accéder à l'électricité. Ces atouts, alliés à des filières de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables et suscitent l'intérêt des grands pays industrialisés caractérisé par d'importants investissements dans ce domaine

Actuellement, le pôle d'In Salah-Timimoune-Adrar n'est pas connecté au réseau interconnecté national, dans le futur cette amélioration dans la région de Bechar permettra le développement de l'interconnexion électrique entre Bechar et le site isolé d'Adrar afin de profiter de l'installation des centrales d'énergies renouvelables dans les régions d'In salah, Adrar et Timimoune (sites prometteurs pour l'énergie éolienne et solaire). Ces régions isolées ont des conditions climatiques très favorables pour l'installation des fermes solaires photovoltaïques et éoliennes. Nous proposons également d'approfondir notre recherche par l'intégration des systèmes de stockage pour stocker l'énergie produite par les énergies renouvelables et non utilisée directement pendant les périodes de production afin d'en restituer une partie pendant les périodes de calme.

Ces solutions proposées pour le développement du ce réseau à travers l'Algérie peuvent être un sauveur de la puissance économique, notamment après la pandémie de Covid-19.

Une conclusion générale clos notre mémoire.

Références

Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] **CHABANI ZEYNEB**, « La part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national à l'horizon 2030 ». Mémoire de Magister. Université M'Hamed Bougara , Boumerdes.2013-2014.
- [2] **LAHBIB MEBAREK_BILLAH MOHAMMED**, « Etude de performance d'une éolienne dans un milieu saharien en particulier station éolienne de Kabertene ».Mémoire de master. Université Ahmed Draya,Adrar. 30 mai 2016.
- [3] **ADJOUJ LABIBA**, « Contribution à l'étude de l'OPF du réseau Algérien basée sur les énergies renouvelables et les FACTS ». Thèse de doctorat. Université Djillali Liabes, Sidi-Bel-Abbes. Décembre 2018.
- [4] **ATMANIA HANANE**, « La stratégie d'implantation des énergies renouvelables en Algérie –cas de la photovoltaïque ».Mémoire de magister. Université Mohamed Ben Ahmed,Oran.15 janvier 2015.
- [5] **AGGOUN GHANIA**, « Etude qualitative de l'association convertisseur machine pour l'entraînement électriques d'un système de génération éolienne ». Mémoire de Magister .Faculté de Génie Electrique et d'Informatique, Université de Tizi-Ouzuo.2011
- [6] **SADI MOHAMMED EL AMINE_HAMLAT ZOHRA**, «L'impact Des Energies Renouvelables Sur Le Réseau Electrique Ouest Algérien 220 KV».Mémoire de Master. Université Dr Moulay Tahar, Saida. juin 2014
- [7] **ABDALLAH ABDELKADER**, « Un système de Contrôle d'un aérogénérateur pour la production d'énergie électrique ».Mémoire de Magister .Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique, Oran.2011- 2012
- [8] **LAIB MEROUANE_AROUA MOHAMMED_GUETROUN AISSA**, « Modélisation et simulation d'une turbine éolienne à vitesse variable». Mémoire de Master Académique. Université Echahid Hamma Lakhdar, El-Oued.2018-2019
- [9] **DRIS MIDA**, « Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Energie Electrique Hybride (Eolien – Photovoltaïque) ». Thèse de Doctorat en sciences. Université Mohamed Khider, Biskra. Le 10/04/2019
- [10] **ABDELKARIM CHAUCHE**, « Contrôle aérogénérateur ». Mémoire de Master. Université Mohamed Khider, Biskra. juillet 2019
- [11] **BENMBAREK MOHAMED**. « Optimisation d'un parc éolien et son intégration dans un réseau d'énergie électrique ».Mémoire de magister. Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, 2014.
- [12] **Dr.BOUBOU BOUZIANI NAIMA**. « Potentiel et développement des énergies renouvelables en Algérie ».Conférence de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Oran.Vol 19, juillet 2017.
- [13] **CHADLIA HANENE. BAGHANA CHEMS EDINE**, « Installation d'une centrale photovoltaïque dans le réseau isole d'Adrar (p.i.a.t) ». Mémoire de master. Université Badji Mokhtar-Annaba, Juin 2019.

- [14] **Zhor Hadjam**, « Les énergies renouvelables et l'Algérie :Le grand bluff ».journal « EL Wattan ».21 janvier 2020
- [15] **DR.ABDERRAHMENE HAMIDAT**, « Le solaire thermique en Algérie (Histoire et perspectives) ».Article.2012
- [16] **S.OUALI_A.KHELLAF_K.BADDARI**. «Etude des ressources géothermiques du sud algérien ».Revue des Energies Renouvelables. Vol.10 N°3,407-414, 2007.
- [17] **NACHIDA KASBADJI MERZOUK**, Chef de Division Energie Eolienne. « Quel avenir pour l'Energie Eolienne en Algérie ? ». Article.
- [18] **H.ABDERREZEK_K.GASMI**. « Les énergies renouvelables, un pilier de développement de l'agriculture algérienne- cas de l'énergie éolienne ». Revue des Energies Renouvelables. Vol.19 N°3,497-508, 2016.
- [19] **ANTOINE.BEAUDRY**. « Simulateur d'écoulement de puissance en régime triphasé ». Mémoire exigence partielle à l'obtention de la maîtrise. L'école de technologie supérieure. Montréal, 2016.
- [20] **WAEL.AMOR**. « Ecoulement de puissance pour les réseaux de grande dimension et mal-conditionnés ». Mémoire exigence partielle à l'obtention de la maîtrise. L'école de technologie supérieure. Université du Québec, 2018.
- [21] **AHMED.OULD.NAGI**. « Optimisation de l'écoulement de puissance par algorithmes :AG et PSO-TV AC ». Mémoire master. Université Mohamed Khider. Biskra, 2014.
- [22] **BENCHEIKH.ABDELHAK_ DEROUICH.ABDELGHANI**. « Etude de l'écoulement de puissance sur un réseau électrique en présence des systèmes FACTS ». Mémoire master académique. Université Kasdi Merbah. Ouargla, 2016
- [23] **FEDERICO.MILANO**. « Documentation for PSAT ». Version 1.3.4, juillet 14, 2005
- [24] <https://www.algerie1.com/eclairage/pour-s-adapter-aux-nouvelles-mutations-mondiales-l-algerie-face-a-la-necessaire-transition-energetique-10>
- [25] <https://www.notre-planete.info/actualites/4619-energies-renouvelables-bilan-2016>
- [26] <https://www.geo.fr/environnement/la-progression-des-energies-renouvelables-soutenue-par-les-petites-unites-solaires-198180>
- [27]<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-solaire-photovoltaique-en-chiffres>
- [28]<https://www.notre-planete.info/actualites/564-energies-renouvelables-solaire-investissements>
- [29] <https://fr.statista.com/statistiques/828791/capacite-production-energie-solaire-afrique/>
- [30] https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_photovolta%C3%AFque

- [31] <https://www.edfenr.com/actualites/europe-puissance-installee-energie-solaire-devrait-bondir-en-2019/>
- [32] <https://www.edf.fr/entreprises/le-mag/le-mag-entreprises/toutes-les-revues-de-presse/europe/revue-de-presse-europe-18012019>
- [33] <https://les-smartgrids.fr/energie-photovoltaique-chine-monde/>
- [34] <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/huainan-plus-grand-parc-solaire-flottant-du-monde>
- [35] https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/developpement-durable/en-images-la-plus-grande-centrale-solaire-d-asie_130557
- [36] https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/developpement-durable/maroc-l-energie-solaire-entre-dans-l-ere-industrielle_131022
- [37] <https://blogs.mediapart.fr/enerconfort/blog/090616/dubai-et-son-projet-de-la-plus-grande-centrale-solaire-au-monde>
- [38] <https://www.lemondedelenergie.com/lenergie-solaire-moteur-transition-energetique/2017/10/10/>
- [39] <https://www.lemondedelenergie.com/le-solaire-pourrait-etre-la-premiere-source-delectricite-en-2050-aie/2014/10/02/>
- [40] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/l-eolien-en-chiffres>
- [41] <http://www.journal-eolien.org/tout-sur-l-eolien/la-puissance-eolienne-en-france/>
- [42] <https://www.redaction.media/articles/turquie-prevoit-de-construire-plus-grand-parc-eolien-offshore-monde/>
- [43] <http://mapecology.ma/actualites/turquie-capacite-eolienne-totale-atteindra-8-gw-2019/>
- [44] https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_%C3%A9olienne_en_Allemagne
- [45] <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/la-chine-a-domine-le-marche-eolien-en-2018-64079/>
- [46] <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/la-chine-fait-un-grand-bond-en-avant-dans-l-offshore-eolien-69583/>
- [47] <https://afrique.latribune.fr/entreprises/la-tribune-afrique-de-l-energie-by-enedis/2019-09-16/energies-le-kenya-inaugure-l-un-des-plus-grands-parcs-eoliens-d-afrique-828160.html>
- [48] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/l-hydraulique-en-chiffres>
- [49] <https://www.planete-energies.com/fr/medias/chiffres/production-mondiale-d-hydroelectricite>

- [50] <https://fr.statista.com/statistiques/565348/evolution-de-la-consommation-d-electricite-hydraulique-dans-le-monde/>
- [51] https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydro%C3%A9lectricit%C3%A9_en_Chine
- [52] https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydro%C3%A9lectricit%C3%A9_en_France
- [53] https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydro%C3%A9lectricit%C3%A9_au_Canada
- [54] **GEOELEC**, « Fiches d'information sur l'électricité géothermique». BRGM, Bureau de recherches géologiques et minières Philippe Calcagno. www.geoelec.eu
- [55] https://www.lemonde.fr/afrique/article/2019/06/17/avec-le-site-de-menengai-le-kenya-s-affirme-comme-le-leader-africain-de-la-geothermie_5477587_3212.html
- [56] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/la-biomasse-en-chiffres>
- [57] <https://www.enedis.fr/actualites/en-2019-la-production-electrique-renouvelable-couvert-23-de-la-consommation-francaise>
- [58] <https://www.rncan.gc.ca/science-donnees/donnees-analyse/donnees-analyse-energetiques/faits-saillants-sur-lenergie/faits-lenergie-renouvelable/20080>
- [59] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>
- [60] <https://era.dz/salon/fr/content/programme-national-des-%C3%A9nergies-nouvelles-et-renouvelables>
- [61] <http://www.aps.dz/economie/102472-oep-l-algerie-appelle-a-une-action-solidaire-et-rapide-pour-faire-face-au-coronavirus>
- [62] <https://fr.sputniknews.com/maghreb/202003051043190753-lalgerie-alerte-sur-la-situation-extremement-grave-du-marche-petrolier-et-sinquiete-pour-son-budget/>
- [63] <https://www.usthb.dz/fr/page/66>
- [64] www.sktm.dz
- [65] <http://www.aps.dz/economie/74937-energie-solaire-appels-d-offres-pour-la-production-de-200-megawatts>
- [66] <http://algerhebdo.net/index.php/2019/11/04/lalgerie-met-le-cap-sur-les-energies-renouvelables-ecoles-mosquees-a-lere-de-lenergie-solaire/>
- [67] <https://maghrebemergent.info/algerie-litalien-eni-va-realiser-un-projet-de-350-mw-denergie-solaire-en-2019/>
- [68] <https://www.algerie-eco.com/2019/06/13/centrales-electriques-solaires-8-entreprises-soumissionnent-a-lappel-doffres-techniques/>
- [69] <https://www.batiactu.com/edito/solaire-thermique-algerie-2016-31091.php>

[70] <https://www.radioalgerie.dz/news/fr/reportage/91607.html>

[71] <https://www.algerie-eco.com/2018/01/01/cder-publication-dun-nouvel-atlas-eolien-de-lalgerie/>

[72] <https://fr.scribd.com/doc/294668823/ch1-METHODE-D-ECOULEMENT-DE-PUISSANCE-DANS-LES-RESEAUX-DE-DISTRIBUTION>

Annexe

Annexe

✚ LES CONSTITUANTS DE LA CENTRALE EOLINNE KABERTENE

Le choix du site de la Centrale KABERTENE dans la wilaya d'Adrar a été fait suite à une étude cartographique sur les grandes régions de vent en Algérie.

L'énergie produite par cette ferme est injectée au poste HTA 30 kV .La ferme éolienne de KABERTENE est composée de 12 aérogénérateurs de 850 kW de puissance chacune soit une puissance totale de la Ferme de 10,2 MW .

✚ Caractéristique d'Aérogénérateur Centrale KABERTENE

Marque	GAMESA
Type	G52- 850
Puissance Totale nominale délivrée par la machine (Somme e la puissance du stator et du rotor	850kW
Puissance nominale du stator	812kW
Puissance nominale rotor	59kW
Tension nominale	690kW
Courant maximum de court-circuit	± 19,5 kA
Limites de Tension en fonctionnement normal	10%(Permanente) +20 %(0,1 s) -20%(1 s)
Conforme à la réglementation de réseau	P.O.12.3.
Fréquence nominale de Travail du Réseau	50/60 Hz
Plage de fréquence autorisée.	±2 Hz (cont.) ±4 Hz(5 s.)
Gamme Cos Φ évolutive	0,95 cap./ind.
Vitesse synchrone du générateur.	1 500 tr/min (F=50 Hz) 1 800tr/min(60Hz)

Vitesse nominale du générateur .	1 620 tr/min (F= 50Hz) 1 944tr/min (F= 60 Hz)
Glissement nominale du générateur	8%
Plage de vitesse avec connexion en triangle	1 050 – 1 900 tr/min
Plage admissible de température de service	- 30 °C/+ 50 °C
Plage admissible de température d'entreposage et de transport	40°C/+ 60°C
Niveau d'humidité maximum autorisé pendant l'exploitation	95 % (sans condensation)
Altitude de fonctionnement. Norme 601 46- 1.	< 2 000 m
Dans la section 6 du G5XDAC.	IP23
Dans les sections 1, 2, 3,4 et 5 du G5XDAC.	IP54
Degré de protection anticorrosion.	C3H
Caractéristique électrique coté Réseau	
Tension Nominale de réseau	690V
Courant Nominale du convertisseur coté réseau	71 Arms
Courant Maximale du convertisseur coté réseau	91 Arms
Courant Minimale du convertisseur coté réseau	59 Arms
Courant Maximin de court circuit	19.5 Arms
CONVERTSEUR DE PUISSANCE (GAMESA)	
Puissance de convertisseur coté Rotor	59kW
Tension nominale du convertisseur coté Rotor	183V
Courant Nominale du convertisseur coté rotor	268A
Tension maximum du convertisseur coté Rotor	608V

Courant maximum du convertisseur coté rotor	354A
Glissement maximum.	26.6%

Tableau (A-2) : caractéristique d'aérogénérateur centrale Kabertene

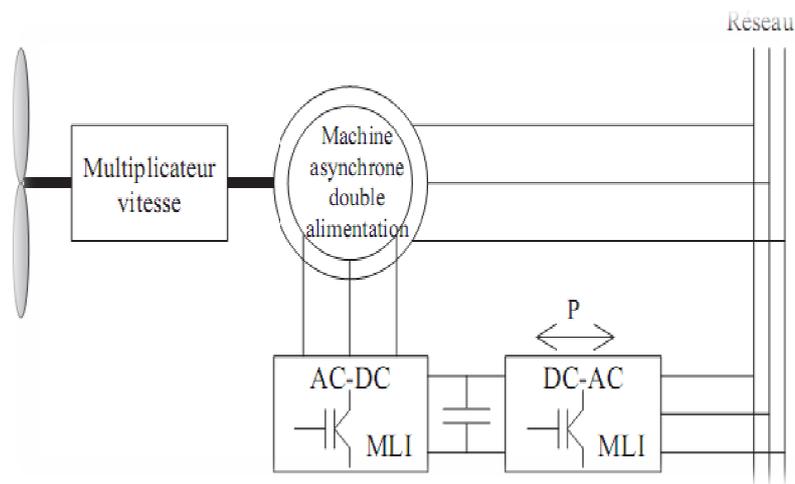


Figure (A-1) : Schéma d'un aérogénérateur

⚡ Transformateur de Puissance (Kiosque)

Chaque kiosque d'éolienne fournit de l'énergie au boucle formé avec la poste d'évacuation centrale via un transformateur élévateur dont les caractéristiques principales sont :

Puissance	1 MW
Perte	5%
Rapport de Transformation	690 V/ 30kV
Tension de fonctionnement	30kV-15/+10%
Perte Fer	2300W
Perte cuivre	14300W à Pmax

Tableau (A-2) : Plaque Signalétique de Transformateur



Figure (A-2) : Transformateur Elévateur de Kiosque