



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE :

Présenté pour obtenir le diplôme de Master académique

MASTER EN ÉLECTROTECHNIQUE

Option : Énergies renouvelables en électrotechnique

• *Par :*

- BNYUCEF HANAA SOUMIYA
- OULD ABDALLAH ZOUHIER ABDELHADI

Intitulé du sujet :

***Etude de la faisabilité pour un système électrique hybride (PV-Eolien)
de 20MW***

Connectée au réseau électrique dans la région de Naama-Mécheria.

Soutenu le 30 / 06 / 2024 devant le jury composé de :

Président : Mr. Bentounes Hadj Adda	Pr	Université de Mostaganem
Examineur : Mme. Ghomri Leila	MCA	Université de Mostaganem
Encadreur : Mme. Boutlilis Fatima	MCA	Université de Mostaganem
Co-encadreur : Melle. Armani Fatima Zohra	Doctorante	Université de Mostaganem

Année Universitaire : 2023/2024



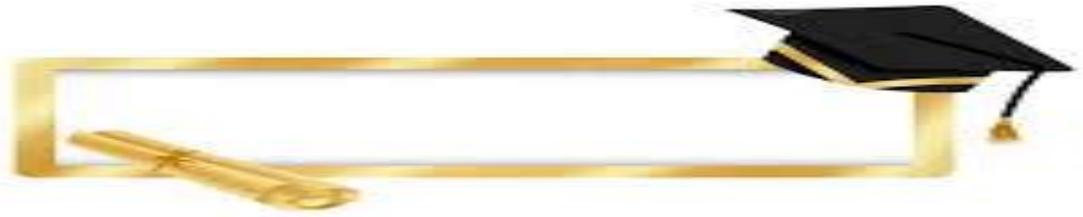
Remerciement

Nous exprimons notre gratitude envers ALLAH le Tout-Puissant pour m'avoir accordé le courage, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail actuel dans les meilleures conditions.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude envers notre encadreur, Madame Boutlilis Fatima, à l'Université de Mostaganem Abdel Hamid Ibn Badis, pour ces informations, ces conseils et l'autonomie accumulée pour mener à bien ce travail. Je tiens également à remercier M^{elle} Amrani Fatima Zohra pour son soutien moral et ses conseils. Grâce à leur compétence et à leurs critiques constructives, ils m'ont permis de réaliser cette mémoire de manière plus autonome.

Nous souhaitons également exprimer notre sincère gratitude envers les membres du jury Mr BENTOUNES HADJ ADDA et Mr GHOMRI LEILA d'avoir accepté d'examiner notre modeste travail.

À tous ceux qui ont contribué pour faire de ce travail une réalité, que ce soit directement ou indirectement, je vous offre ma sincère gratitude et mon respect.



Dédicace

À...

*Celle qui m'a donnée le courage, la bonne volonté et le soutien depuis mon enfance, à ma mère
Fatiha à qui je dois toute ma vie et toutes mes réussites.*

*Celui qui a donné le bon sens à ma vie, qui n'a jamais cessé de me lancer l'appel d'amour et d'aide
moral et matériel, et à qui me donne la confiance, à qui je dois beaucoup à mon père Chabane.*

*A celles qui ont été témoins avec moi des problèmes d'étudier et de veiller tard le soir, c'était donc
la meilleure aide pour moi, ma chère sœur Aya et cher frère Belkacem*

A mon grand-père Mohamed que Dieu prolonge sa vie

A mes tantes adorées Khaira, Mima et Nounou

*A toute ma famille, toute la famille de Benyoucef et tous mes amis sans citer des noms pour ne pas
oublier d'autres.*

Mon ami, Mon frère et mon partenaire ont cette note Ould Abdallah Zouhier.

Benyoucef hanaa soumiya



Dédicace

Et surtout, nous voudrions exprimerons sincères Remerciements à la famille J'offre toute ma gratitude, mes remerciements et mes louanges à tous les membres de ma famille pour leurs efforts moraux et matériels afin de mener à bien le processus académique avec facilité et sécurité, aux amis J'adresse mes sincères salutations à mes amis pour m'avoir aidé à tout moment, Et à ma chère sœur, qui a été une raison importante pour me donner une motivation positive pour obtenir davantage de succès, aux Camarades de classe et à toute personne qui ont Contribué à ce travail en nous fournissant en Continu soutien et encouragement tout au long des Années d'études Étendant le travail de cette note.

Toute appréciation et louange à mon ami et partenaire pour tous les efforts et le travail déployés pour faire de cet humble travail un succès. Priez Dieu pour plus de succès et de réussite dans votre vie.

Ould Abdallah Zouhier.

Résumé :

L'Algérie est confrontée au défi de créer de grandes centrales solaires photovoltaïques reliées au réseau pour améliorer l'environnement et contribuer à soulager le réseau électrique. Cependant, les systèmes photovoltaïques actuels sont coûteux et ne permettent pas de stockage d'énergie. L'hybridation des générateurs photovoltaïques existants avec d'autres sources d'énergie renouvelable est donc essentielle pour augmenter la durée de production quotidienne. Un projet est prévu pour hybrider la centrale photovoltaïque de NAAMA de 20MW avec un parc éolien. Notre objectif est de concevoir la conception optimale d'un système d'énergie hybride (PV/Eolien/Réseau) destiné à fournir une partie d'énergie renouvelable aux régions de Mecheria - Naama. Le système hybride vise à résoudre les problèmes d'intermittence des énergies renouvelables et contribue à soulager le réseau électrique. Nous avons simulé le fonctionnement du système pour déterminer la configuration optimale avec le logiciel Homer. Les résultats montrent que chaque source contribue significativement à la production d'électricité. Sur le plan économique, le coût de l'énergie (COE) est estimé à 0.0038 €. Les systèmes énergétiques hybrides offrent un potentiel prometteur pour la transition énergétique en Algérie,

Les mots clé :

Centrale NAAMA de 20MW,Hybride ,système (PV/Eolien/Reseau), logiciel Homer,(COE)

summary:

Algeria faces the challenge of establishing large grid-connected photovoltaic solar power plants to enhance the environment and alleviate strain on the electrical grid. However, current photovoltaic systems are costly and lack energy storage capabilities. Hybridizing existing photovoltaic generators with other renewable energy sources is therefore crucial to extend daily production hours. A project is planned to hybridize the 20MW NAAMA photovoltaic plant with a wind farm. Our objective is to design the optimal configuration for a hybrid energy system (PV/Wind/Grid) aimed at providing renewable energy to the Mecheria - Naama regions. The hybrid system aims to mitigate the intermittency issues of renewable energies and relieve pressure on the electrical grid. We simulated the system operation to determine the optimal setup using Homer software. Results indicate significant contributions from each energy source to electricity production. Economically, the Levelized Cost of Energy (COE) is estimated at €0.0038. Hybrid energy systems hold promising potential for Algeria's energy transition.

Keywords:

NAAMA 20MW plant, Hybrid, PV/Wind/Grid system, Homer software, COE

ملخص:

تواجه الجزائر التحدي المتمثل في إنشاء محطات كبيرة للطاقة الشمسية الكهروضوئية متصلة بالشبكة لتحسين البيئة والمساعدة في تخفيف شبكة الكهرباء. ومع ذلك، فإن الأنظمة الكهروضوئية الحالية باهظة الثمن ولا تسمح بتخزين الطاقة. ولذلك فإن تهجين المولدات الكهروضوئية الحالية مع مصادر الطاقة المتجددة الأخرى أمر ضروري لزيادة مدة الإنتاج اليومي. ومن المقرر مشروع تهجين محطة النعامة للطاقة الكهروضوئية ربح/شبكة) الذي يهدف إلى توفير جزء من (PV/ بقدره 20 ميغاوات مع مزرعة الرياح. هدفنا هو تصميم التصميم الأمثل لنظام الطاقة الهجين الطاقة المتجددة لمناطق المشربة - النعامة. ويهدف النظام الهجين إلى حل مشاكل انقطاع الطاقات المتجددة ويساهم في تخفيف شبكة الكهرباء. لقد وأظهرت النتائج أن كل مصدر يساهم بشكل كبير في إنتاج الكهرباء. Homer قمنا بمحاكاة تشغيل النظام لتحديد التكوين الأمثل باستخدام برنامج ومن الناحية الاقتصادية، تقدر تكلفة الطاقة بـ 0.0038 يورو. توفر أنظمة الطاقة الهجينة إمكانات واعدة للتحويل الطاقوي في الجزائر،

الكلمات الرئيسية

(COE),محطة نعمة بقدره 20 ميغاوات، هجينة، نظام (كهروضوئية/رياح/شبكة)، برنامج هومر،

Sommaire

Résumé	
Dedicase	
Liste de la figure	
liste de tableau	
Introduction générale	
Chapitre I : Généralités sur les systèmes hybrides d'énergie	
I.1-Introduction	2
I.2-Aperçus sur le programme de transition énergétique en Algérie : Généralités sur les systèmes hybrides d'énergie	2 1
I.3-Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides :	2
I.3.1- Les systèmes hybrides éolien-photovoltaïque raccordée au réseau :	3
I.3.2-Avantages et limites des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques : [8]	4
I.3.3-Composants d'un système hybride photovoltaïque- éolien relié au réseau : [9].	5
I.3.3.1- système photovoltaïque :	5
I.3.4- Potentiel solaire en Algérie :	5
I.3.5- Système PV Raccordé au réseau :	6
I.3.5.1 - Installations photovoltaïques réalisées en Algérie	7
I.3.6- Système éolien [13]	7
I.3.6.2- Potentiel éolien en l'Algérie :	9
I.3.6.3- Centrales éoliennes réalisée en Algérie :	10
I.4- Réseaux électrique	10
I.4.1- Description du réseau électrique :	10
I.5- La stratégie de gestion des systèmes hybrides [20]	11
I.5.1- Contrôle centralisé : [21]	11
I.5.2- Contrôle distribué :	12
I.5.3 - Contrôle hybride centralisé et distribué :	12
I.6 - Méthodes de dimensionnement	13
I.6.1 - Méthode de dimensionnement par logiciels	13
I.6.2 – HOMER	13
I.7- Les critères d'évaluation d'un système hybride [25]	13
I.7.1-Critères et indicateurs :	14
I.7.2-Simulation et optimisation du système hybride :	14
I.7.3-Analyse de sensibilité et d'incertitude :	14
I.7.4-Validation et vérification :	14
I.7.5-Communication et diffusion :	Error!
	Bookmark not defined.
I.8-Objectif de mémoire :	14
I.9- Conclusion :	15

Chapitre II : évaluation du dimensionnement et du fonctionnement des éléments du système hybride pour l'étude énergétique	
II.1- Introduction	16
II.2- Description des données météorologiques de la zone :	18
II.3--Analyse de la conception du site éolien de Mécheria :	19
II.3.1- Modélisation du système éolien : [28]	19
II.4 - Dimensionnement d'un site éolien : [29]	19
II.4.1- Détermination du potentiel de site par le logiciel WAsP	19
II.4.1.1- Résultats d'évaluation du potentiel du site et discussions :	19
II.5- Comparaison de la densité de L'énergie éolienne et de la vitesse moyenne du vent :	21
II.6- Directions dominantes du vent (Roses de vent)	22
- Direction du vent dominant (Rose des vents) :	22
II.7-Conception d'un parc éolien de 20 MW à Mécheria :	23
II.7.1- Description de l'éolienne choisie :	23
II.7.2- Configurations d'implantations des turbines :	24
II.7.3- Implantation a deux rangées avec couloir éolien :	24
II.7.4- Implantation a une seule rangée :	25
II.7.5- résumé d'analyse de la conception du parc éolien	28
II.8- Evaluation de la conception de la centrale photovoltaïque de NAAMA	26
II.8.1- Introduction	26
II.8.2- Modélisation du système photovoltaïque :	26
II.8.3- Modèles de comportement du champ photovoltaïque :	26
II.8.3.1- Le modèle du rendement:[35]	26
II.8.3.2- Modèle qui regroupe la puissance au rendement : [36]	27
II.9- Méthodologie de dimensionnement	28
II.9.1- Les étapes de dimensionnement d'un système photovoltaïque [38]	29
II.9.1.1-Le choix des modules photovoltaïque :	29
II.9.1.2- Production électrique d'un module en une journée :	29
II.9.1.3- Évaluation du coefficient des pertes C_p :	30
II.9.2- L'inclinaison des modules photovoltaïques	30
II.9.3- Composition du sous champ photovoltaïque d'un onduleur :	31
II.9.4-Nombre totale des panneaux par onduleur :	31
II.9.5- Puissance nominale :	31
II.9.6- Interprétation et évaluation :	32
II.10- Le câblage	32
II.10.1- Le schéma unifilaire :	32
II.10.2- Le courant d'emploi :	34
II.10.3- Le courant admissible :	34
II.11- Étude d'un système hybride à deux sources renouvelables reliées au réseau	34
II.11.1- Introduction	34
II.11.2- Structure du système :	34

II.11.3- Le Système photovoltaïque :	34
II.11.4- Le générateur éolien :	34
II.11.5- Charge à satisfaire par le système hybride :	35
II.12- Méthode et hypothèses [42]	35
II.13- Conclusion	37
Chapitre III : <i>Simulation de fonctionnement du système hybride</i>	
III.1-Introduction :	39
III.2 Simulation dans le HOMER	39
III.3 Description du système :	39
III.4- Site d'implantation :	40
III.5 Données météorologiques	40
III.5.1 Ressource solaire	40
III.5.2 Ressource éolienne :	41
III.5.3 Ressource de température :	42
III.5.4 Profil de charge :	42
III.6 La configuration du éolien connecté au réseau	43
III.7 Résultats de simulation	44
III.7.1- L'énergie produite par les turbines éoliennes :	44
III.7.2- Fonctionnement et performances optimales du réseau:	46
III.7.3 La répartition des couts de l'installation	47
III.7.4- la production énergétique du système étudié :	48
III.7.5- La compare économique :	48
III.7.6- Les Indices économique :	49
III.7.7- Les paramètres économiques du système :	49
III.9- Résultats de simulation :	50
III.9.1- L'énergie produite système PV :	50
III.9.2- Fonctionnement et performances optimales du convertisseur:	52
III.9.3-Réseaux électriques :	52
III.9.5- la production énergétique du système étudié :	54
III.9.6- La compare économique :	55
III.9.7- Les Indices économique :	55
III.9.8- Les paramètres économiques du système :	55
III.10- Création du système hybride :	56
III.10.1- Les configurations du système hybride :	56
III.10.3- L'énergie produite par les turbines éoliennes :	57
III.10.4- Fonctionnement et performances optimales du convertisseur:	58
III.10.9- Les Indices économique :	63
III.11- Comparaison entre 3 systèmes étudiés :	64
III.12- Conclusion :	64
- <i>Conclusion Générale</i>	66

Liste du Figure

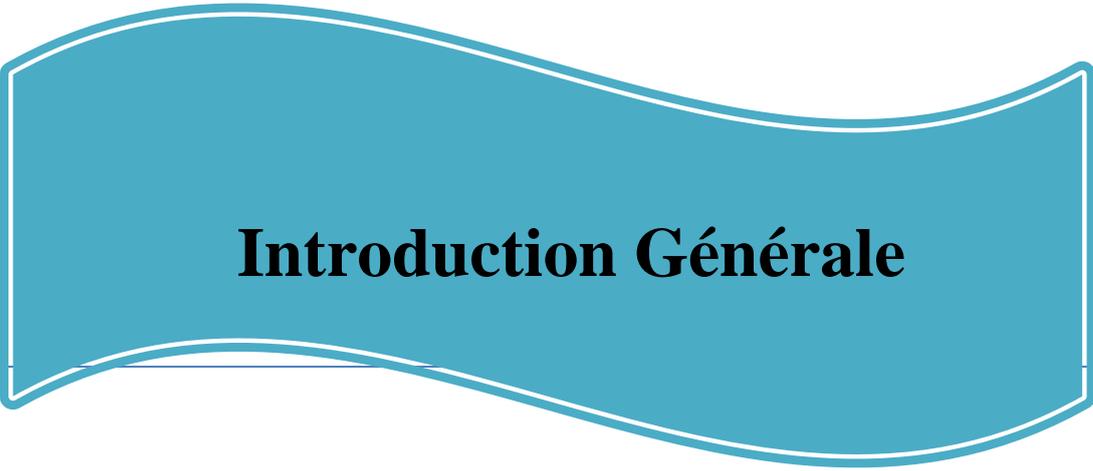
N°	Figure	Page
01	Figure (I.1): Schéma général de système énergétique hybride (Multi-sources, charges et stockage)	2
02	Figure (I.2) : Exemple d'une configuration hybride générale raccordée au réseau Couplage éolien photovoltaïque.	4
03	Figure (I.3) : Schéma simplifié d'un Système PV.	5
04	Figure (I.4) : Carte de l'Irradiation Globale Directe Annuelle Moyenne en Algérie	6
05	Figure (I.5) : Schéma d'une installation photovoltaïque raccordé au réseau.	6
06	Figure (I.6) : Projet de 354.3 MWc en centrales photovoltaïques en Algérie.	7
07	Figure (I.7): Les composants de l'aérogénérateur.	9
08	Figure (I.8) : La vitesse moyenne du vent au niveau l'Algérie.	11
09	Figure (I.9) : Eolienne d'Adrar.	11
10	Figure (I.10) : architecture d'un réseau électrique.	12
11	Figure (I.11) : Stratégie de gestion d'énergie centralisée.	13
12	Figure (I.12) : Stratégie de gestion d'énergie distribuée.	13
13	Figure (I.13) : Stratégie de gestion d'énergie hybride centralisée et distribuée	14
14	Figure (I.14) : Montre le système multi sources proposé pour la conception dans cette région de (Naâma -MECHERIA).	16
15	Figure (II.1) : variations moyennes mensuelles de la vitesse du vent	21
16	Figure (II.2): variation annuelle moyenne de la vitesse du vent.	22
17	Figure (II.3) : Comparaison des variations mensuelles de la densité de l'énergie éolienne et de la vitesse moyenne du vent.	22
18	Figure (II.4): Comparaison des variations annual's de la densité de l'énergie éolienne et de la vitesse moyenne du vent.	23
19	Figure (II.5) : Rose des vents annuelle de Mécheria.	24
20	Figure (II.6) : Cartographie de site de mécheria.	25
21	Figure (II.7) : Courbe de puissance de la turbine Énergie éolienne 2MW.	25
22	Figure (II.8) : Disposition des éoliennes (Énergie éolienne 2MW) sur la carte de production annuelle d'énergie (AEP) du site à 80 m au-dessus du niveau du sol.	26
23	Figure (II.9): Disposition des éoliennes (Puissance éolienne 2 MW) au cours de la production annuelle d'énergie.	27
24	Figure (II. 10): branchement de SKID avec onduleurs.	30
25	Figure (II.11): branchement des RMU avec SKID.	30
26	Figure (II.12): branchement des RMU avec transformateur de réseau.	30
27	Figure (II.13) : Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques	32
28	Figure (II.14): Câble DC de chaine solaire (combineur en T).	34
29	Figure (II.15): Schéma Unifilaire d'un box.	34
30	Figure (II.16): Schéma Unifilaire d'un box avec le câble de sortie	35
31	Figure (II.17): Schéma Unifilaire d'un central box les deux câbles vers l'onduleur.	35
32	Figure (II.18) : La variation journalière de la charge est présentée sur	37
33	Figure (II.19): illustration de l'algorithme de calcul.	38
34	Figure (III.1): Schéma de l'architecture de simulation de Homer.	42
35	Figure (III.2): Interface HOMER.	42
36	Figure (III.3): la carte géographique du site. Naama (Centrale PV).	42
37	Figure (III.4): Les moyennes mensuelles du rayonnement solaire global sur le plan horizontal.	43
38	Figure (III.5): la courbe de la puissance produite par la turbine en fonction de vitesse du vent.	44

39	Figure (III.6): la vitesse mensuelle du vent (m/s).	44
40	Figure (III.7): Profil de température journalier extrait de HOMER.	44
41	Figure (III.8):Profil de charge annuelle.	45
42	Figure (III.9): Configuration du système Eolien connecté au réseau.	45
43	Figure (III.10): la configuration optimal donner par homer.	46
44	Figure (III.11): la production annuelle d'électricité par la turbine éolienne.	46
45	Figure (III.12): Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois janvier pour les différents éléments du système (Eolien/Réseau).	47
46	Figure (III.13): Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois Avril pour les différents éléments du système (Eolien/Réseau).	47
47	Figure (III.14): L'énergie vendue et acheté du réseau en fonction des heures de la journée.	48
48	Figure (III.15): Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois janvier pour les achats et ventes de réseau en KW	48
49	Figure (III.16): Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois Avril pour les achats et ventes de réseau en KW.	49
50	Figure (III.17): Résumer des opérations et des remplacements pendant toute la durée de fonctionnement du système.	49
51	Figure (III.18): La production énergétique du système hybride.	50
52	Figure (III.19): Le compare économique.	50
53	Figure (III.20): Récapitulatif du cout.	51
54	Figure (III.21): Configuration du système PV avec convertisseure connecté au réseau	51
55	Figure (III.22): la configuration optimale donnée par Homer.	52
56	Figure (III.23): La production électrique annuelle du champ PV.	52
57	Figure (III.24): Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois janvier pour les différents éléments du système (PV/Réseau).	53
58	Figure (III.25): Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois juillet pour les différents éléments du système (PV/Réseau).	53
59	Figure (III.26): la puissance d'entrée et sortie de convertisseur.	54
60	Figure (III.27): L'énergie vendue et acheté du réseau en fonction des heures de la journée.	54
61	Figure (III.28): : Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois janvier pour les achats et ventes de réseau en KW.	55
62	Figure (III.29): Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois juillet pour les achats et ventes de réseau en KW.	55
63	Figure (III.30): Résumé des opérations et des remplacements pendant toute la durée de fonctionnement du système	56
64	Figure (III.31): la production énergétique du système étudié	56
65	Figure (III.32):la compare économique de système optimal	57
66	Figure (III.33) : Récapitulatif du cout	57
67	Figure (III.34): Configuration du système hybride	58
68	Figure (III.35): la configuration optimale donnée par Homer	58
69	Figure (III.36) : La production électrique annuelle du champ PV	59

70	Figure (III.37) : la production annuelle d'électricité par la turbine éolienne	60
71	Figure (III.38) : la puissance d'entrée et sortie de convertisseur	60
72	Figure (III.39): Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois janvier pour les différents éléments du système (PV/Eolien/Réseau)	61
73	Figure (III.40): Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois juillet pour les différents éléments du système (PV/Eolien/Réseau)	61
74	Figure (III.41) : L'énergie vendue et achetée du réseau en fonction des heures de la journée	62
75	Figure (III.42) : Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois janvier pour les achats et ventes de réseau en KW	62
76	Figure (III.43) : Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois juillet pour les achats et ventes de réseau en KW	63
77	Figure (III.44) : Résumé des opérations et des remplacements pendant toute la durée de fonctionnement du système	63
78	Figure (III.45) : la production énergétique du système hybride	64
79	Figure (III.46): la compare économique de système optimal	64
80	Figure (III.47) : Récapitulatif du coût	65

Liste de tableaux

N°	Tableaux	Page
01	Tableau (I.1) : Les centrales Photovoltaïques et éoliennes réalisées en Algérie (2013- 2017).	7
02	Tableau (II.1) : les données météorologiques et Coordonnées géographiques des sites.	20
03	Tableau (II.2) : Vitesse moyenne mensuelle en m/s.	21
04	Tableau (II.3) : Vitesse Moyenne annuelle en m/s.	22
05	Tableau (II.4): les bornes de la production d'énergie du mois.	22
06	Tableau (II.5) : les bornes de la production d'énergie annuelle.	23
07	Tableau (II.6) : Paramètres de résultat produits par la ferme.	26
08	Tableau (II.7): Résultats de simulation de la production annuelle totale du parc éolien.	26
09	Tableau (II.8) : Résultats de simulation de la production annuelle totale du parc éolien sans corridor.	27
10	Tableau (II.9) : Tableau récapitulatif de dimensionnement de la centrale PV.	33
11	Tableau (III.1) : l'irradiation journalière moyenne pour chaque mois est déterminée NAAMA	43
12	Tableau (III.2) : Résume les paramètres de fonctionnement de la ferme éolienne.	47
13	Tableau (III.3) : Le taux de production annuelle par chaque source	50
14	Tableau (III.4) : Les paramètres économique du système.	51
15	Tableau (III.5): les paramètres de fonctionnement du GPv.	52
16	Tableau (III.6) : Le taux de production annuelle par chaque source.	56
17	Tableau (III.7): Les paramètres économique du système.	57
18	Tableau (III.8) : les paramètres de fonctionnement du GPv.	59
19	Tableau (III.9) : Résume les paramètres de fonctionnement de la ferme éolienne.	60
20	Tableau (III.10): Le taux de production annuelle par chaque source	64
21	Tableau (III.11): Les paramètres économique du système	65
22	Tableau (III.12): Comparaison des différentes configurations	66



Introduction Générale

Introduction générale

Aujourd'hui, la société est bien consciente que les énergies renouvelables doivent à tout prix remplacer les centrales thermiques et nucléaires en raison du grand danger de rejet de gaz polluants dans l'atmosphère et du risque élevé de l'uranium. De plus, la vie humaine moderne a besoin de beaucoup d'électricité pour accéder aux soins médicaux, à l'éducation, aux communications et au développement des économies locales. Chaque pays essaie de trouver un modèle spécifique, efficace, durable et moins coûteux. Bien que l'Algérie soit depuis longtemps confrontée au défi de concevoir et de construire des centrales solaires photovoltaïques à grande échelle connectées au réseau. Ces stations sont capables d'assister les technologies traditionnelles, afin d'améliorer l'environnement et de fournir à la population une énergie électrique propre et fiable.

Mais malgré cette progression dans les réalisations du programme algérien des énergies renouvelables, le problème est que toutes les réalisations étaient des systèmes photovoltaïques mono source et sans stockage [1]. Le coût actuel net est très élevé comparé au temps de production journalier limité à une moyenne annuelle 8H/jour en ajoutant aussi les coûts des arrêts de maintenance.

L'hybridation des générateurs photovoltaïques existants avec d'autres sources d'énergie renouvelables est donc essentielle. Parce que la combinaison des sources d'énergie augmente la durée de production quotidienne d'électricité propre (taux de pénétration des ER), réduit les intermittences d'énergies renouvelables, réduit le pourcentage d'émissions de gaz à effet de serre et élimine les temps d'arrêt pour maintenance. Ainsi, selon la qualité des services fournis par les systèmes multi-sources, le coût actuel net (NPC), quel que soit son montant, est considéré comme meilleur que le coût d'investissement dans les systèmes mono-source [2].

Dans ce contexte, le travail proposé dans ce mémoire de fin d'étude consistera à hybrider la centrale photovoltaïque de 20 MW, située au niveau de Naàma dans le sud-ouest algérien, avec un parc éolien dimensionné en 2024 au niveau de Mécheria [3]. Afin de réaliser un système hybride optimal connecté au réseau et de renforcer la production de l'énergie électrique propre qui ne cesse d'augmenter on évitant le problème de stockage par batterie qui est très couteuse. Il est bien connu que l'énergie éolienne et solaire photovoltaïque à grand échelle connectée au réseau s'est révélée économiquement efficace dans de nombreuses régions du monde rural [4].

Pour bien faire, notre travail, sera orienté sur les axes suivants :

-Le premier axe abordera les aspects généraux des énergies renouvelables en Algérie, en définissant les systèmes multi-sources et en se penchant sur les systèmes hybrides éolien-photovoltaïque connectés au réseau. Nous présentons ensuite les principaux composants, avantages et inconvénients. Enfin, sur la base des connaissances scientifiques acquises dans cette constatation, nous souhaiterons développer les objectifs de notre contribution.

-Le deuxième axe sera consacré à l'évaluation du dimensionnement et du fonctionnement individuel de chaque source. Une étude sera réservée à l'évaluation et l'apprentissage de conception du site éolien nouvellement conçu et l'acquisition du savoir ainsi que des techniques d'analyse des paramètres d'énergie éolienne. Une autre sera dédié à l'appréciation du dimensionnement de la centrale photovoltaïque installée à NAËMA en service depuis 2017. Afin d'assurer la progression et la réussite de cette hybridation.

-Le dernier axe sera réservé à la simulation du fonctionnement du système hybride proposé, la détermination de la configuration optimale faisable et l'étude technico économique de ce dernier par le logiciel Homer. La détermination de ces configurations repose d'abord sur des facteurs économiques et des paramètres techniques. La comparaison finale portera sur le taux de pénétration de la production d'énergie renouvelable et la grande quantité d'émissions de dioxyde de carbone.

Ces indicateurs donnent donc une meilleure rentabilité en termes de coût économique par rapport à l'investissement et présentent aussi une meilleure optimisation du système d'énergie hybride utilisé. Ce travail se terminera par une conclusion générale, où les indicateurs de succès de ce programme d'hybridation seront discutés et identifiés.

Généralités sur les systèmes hybrides d'énergie

I.1-Introduction

L'énergie électrique issue de sources renouvelables, en particulier l'énergie éolienne et solaire, représente aujourd'hui une alternative de production intéressante dans les systèmes électriques mondiaux. Cependant, son utilisation est limitée en raison du coût d'investissement élevé. De même, les fluctuations de charge sur les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément corrélées avec les ressources énergétiques disponibles. Pour dépasser cette limite, la solution à conserver, pour les consommateurs d'électricité, est certainement de combiner plusieurs sources, et construire un des systèmes hybrides éoliens photovoltaïques connectés au réseau ou autonomes.

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'hybridation des systèmes photovoltaïques installés en Algérie à partir de sources éoliennes. Dans ce premier chapitre introductif, nous allons définir globalement les systèmes multi sources. Nous présenterons ensuite plus en détail les systèmes hybrides éoliens et solaires connectés au réseau. Ensuite, ses principaux composants, leurs avantages et leurs inconvénients seront décrits. Enfin, sur la base des connaissances scientifiques acquises dans ce chapitre, nous développerons les objectifs de notre contribution.

I.2-Aperçus sur le programme de transition énergétique en Algérie :

L'Algérie s'est engagée dans une stratégie de promotion des énergies renouvelables en lançant d'ambitieux programmes de développement des énergies propres et de l'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien repose sur une politique axée sur le développement des ressources inépuisables et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'après-pétrole. En général, ce programme comprend deux grandes phases. La première porte sur le Programme National de Développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique (2011-2030), et la seconde est une mise à jour de la première tranche appelée Programme National pour la Transition Énergétique (2020-2035).

Cependant, le gouvernement a mis en place des objectifs prétentieux dans le développement des énergies renouvelables à l'horizon 2030. Ces objectifs ont été discutés et adoptés en 2011 avec le lancement des travaux de réalisation des centrales photovoltaïques raccordé au réseau au niveau des hauts plateaux algériens. Ce programme a été actualisé par le gouvernement en 2015, en augmentant les capacités de production en énergies renouvelables à 22000 MW dans le parc national, à l'horizon 2030, dont plus de 4500 MW seront réalisés d'ici 2020. Ces objectifs visent à réaliser 40% de la production d'énergie électriques par des sources les énergies renouvelables (37% solaire, 3% éolien) [5].

I.3-Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides :

Les systèmes énergétiques hybrides sont des installations complexes combinant différentes sources renouvelables ou combinées avec des sources conventionnelles, différents éléments de stockage et différentes charges. Ils compensent le caractère intermittent des sources renouvelables et offrent une meilleure efficacité énergétique globale. Leur intérêt essentiel est la possibilité d'autonomie énergétique qu'ils permettent vu qu'ils ne dépendent pas d'une seule source. Ils peuvent résoudre en très grande partie le problème de la disponibilité de l'énergie [6]. La figure (I.1) représente le schéma général des systèmes hybrides. Un bus électrique est commun à tous les éléments qui sont connectés. Ces derniers sont regroupés selon leur fonction électrique : les éléments de génération (ou sources), les éléments de charge et les éléments de stockage (Stockage, en pointillé sur la figure).

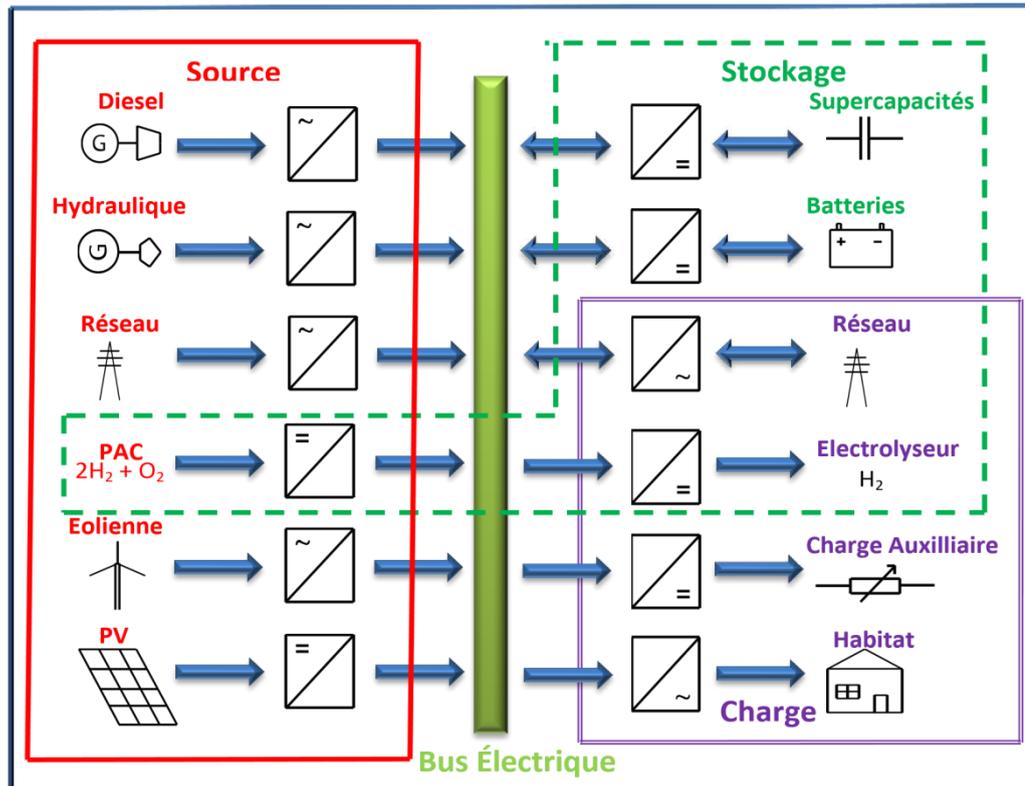


Figure (I.1) : Schéma général de système énergétique hybride (Multi-sources, charges et stockage)

Les systèmes énergétiques hybrides peuvent être connectés aux réseaux électriques ou autonomes. La production d'énergie hybride est alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de production et de consommation. Le raccordement des sources hybrides aux réseaux électriques doit respecter certaines normes qui ne concernent pas nécessairement le domaine des énergies renouvelables.

La plupart du temps, les centrales hybrides sont soumises aux réglementations CEI (Commission Electrotechnique Internationale) qui dominent la normalisation des systèmes utilisant des énergies renouvelables. Aux États-Unis, la série de normes IEEE 1547 régit tous les aspects de l'interconnexion entre les sources renouvelables et le réseau. Ces normes imposent des exigences sur la qualité de l'énergie produite en termes de tension, de fréquence et d'harmoniques. Ces limitations nécessitent la mise en œuvre de boucles de contrôle spécifiques utilisant des dispositifs de filtrage dans les systèmes hybrides.

La majorité des systèmes hybrides connectés au réseau ne contiennent pas de périphérique de stockage. Mais dans certains systèmes connectés à un réseau électrique « faible », des unités de stockage sont introduites pour renforcer le réseau en cas de panne.

I.3.1- Les systèmes hybrides éolien-photovoltaïque raccordée au réseau :

La figure (I.2) donne un exemple typique d'unité de production hybride connectée à un réseau contenant deux sources d'énergie éolienne et solaire. Le « nœud électrique » permet la connexion et la répartition de l'énergie entre les différents composants du système. Les systèmes hybrides sont souvent classés en deux filières selon le type de nœud électrique de couplage et les convertisseurs statiques associés. La première est caractérisée par un couplage des sources autour d'un bus commun alternatif AC, la seconde topologie des systèmes hybrides est fondée sur un couplage avec un bus commun continu DC [7]. Les systèmes hybrides à configuration de bus commun continu sont plus adaptés à une génération de petite puissance. La majorité de ces systèmes sont utilisés en sites isolés

où l'énergie est produite et directement consommée en courant continu sur place ou à proximité des générateurs. Les systèmes hybrides avec un couplage des sources autour d'un bus AC sont plus adaptés à une génération distribuée (raccordée au réseau électrique) et sont fréquemment utilisés dans le cas d'une production de plus grande puissance. Alors leurs L'objectif principal de ce travail est de dimensionner et d'optimiser une ferme éolienne a MECHERIA sud-ouest de l'Algérie pour la connectée à la centrale photovoltaïque de Naâma, afin de concevoir un système hybride raccordé au réseau. Toutefois pour augmenter la pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale d'énergie électrique en Algérie, réduire la pollution et améliorer le service énergétique dans la région sud comme le montre la figure (I.2).

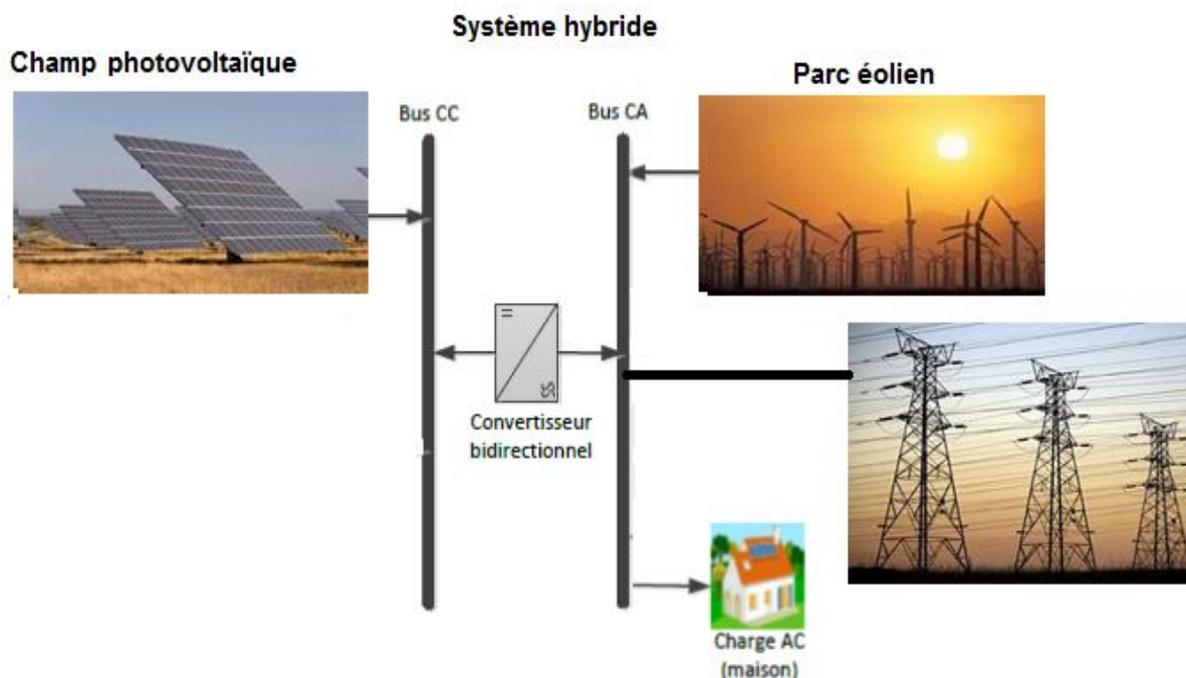


Figure (I.2) : Exemple d'une configuration hybride générale raccordée au réseau
Couplage éolien photovoltaïque.

I.3.2-Avantages et limites des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques : [8]

Les systèmes hybrides les plus répandus intègrent un couplage éolien-PV. L'intérêt de combiner ces deux sources d'énergie se justifie par le fait qu'elles offrent les meilleures ressources combinées. L'intégration entre ces deux sources est très importante, que ce soit à l'échelle annuelle ou journalière. En fait, les vents soufflent davantage en hiver et en automne et moins au printemps, tandis que le rayonnement solaire est plus intense en été. De même, tout au long de la journée, le rayonnement solaire est plus fort pendant la journée tandis que les vents peuvent également souffler la nuit. Cette intégration saisonnière et quotidienne des ressources énergétiques solaires et éoliennes permet par exemple de fournir une énergie plus fiable, qui dépend bien entendu des lieux. Ainsi, créer un système hybride en combinant panneaux photovoltaïques et éoliennes connectés au réseau peut répondre aux besoins énergétiques tout au long de l'année.

Néanmoins, l'hybridation de ces sources d'énergies renouvelables pose certains problèmes :

✓

Il y a une difficulté à pouvoir produire à chaque instant l'énergie demandée par la charge. Cela implique une évaluation précise des ressources renouvelables du site et une conception adaptée du système, optimisant ainsi les ressources énergétiques et conduisant à une quantité minimale d'énergie non fournie.

- Ensuite, l'hybridation pose le problème de l'interconnexion et de la gestion énergétique, donc, la commande de ces systèmes est faite en fonction des méthodes de supervision.
- La dynamique des générateurs d'énergie renouvelable peut également poser des problèmes dans le fonctionnement des systèmes hybrides et générer des problèmes de qualité de l'énergie (tension et fréquence variation)...

I.3.3- Composants d'un système hybride photovoltaïque- éolien relié au réseau : [9].

I.3.3.1- système photovoltaïque :

Un système photovoltaïque convertit le rayonnement solaire en électricité. Il est constitué de plusieurs éléments :

- Des modules ou panneaux regroupant un grand nombre de cellules au sein du module.
- Un régulateur de tension continu DC/DC.
- Un n onduleur pour la conversion du courant continu en courant alternative.

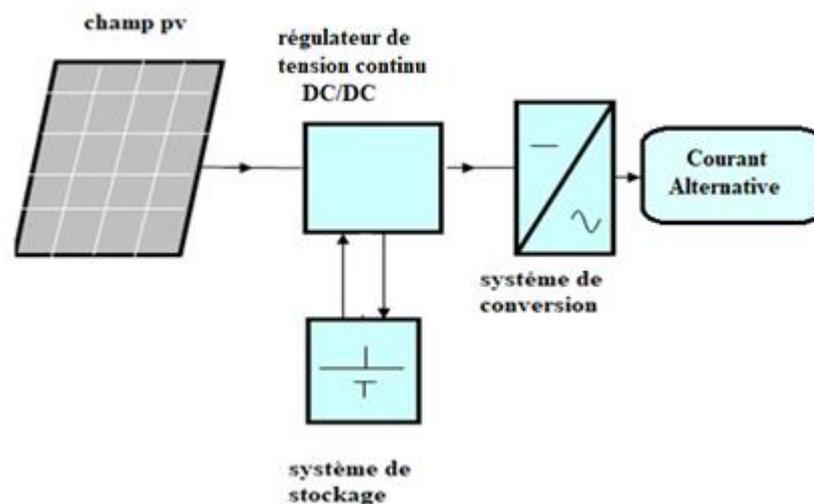


Figure (I.3) : Schéma simplifié d'un Système PV.

I.3.4- Potentiel solaire en Algérie :

- L'Algérie reçoit chaque année sur l'ensemble de son territoire une des plus grandes énergies solaires au monde (1.4). Elle s'élève à environ 5,2 millions de kilowattheures/an, soit 430 fois les réserves prouvées d'hydrocarbures de l'Algérie et 4,8 fois les réserves prouvées de pétrole de l'ensemble du monde.
- L'énergie solaire possède le plus grand potentiel d'énergie renouvelable en Algérie. Cela représente 169,44 térawatts heures par an, soit 5 000 fois la consommation électrique de l'Algérie. Ainsi, avec plus de 2 000 heures d'exposition au soleil par an et jusqu'à 3 900 heures dans les hauts plateaux et dans le désert, l'énergie solaire reçue quotidiennement sur le territoire algérien s'élève à environ 1 700 kWh/m²/an au nord et 2 263 kWh/an. . m²/an au sud. Cela signifie une moyenne de plus de 2200 kWh/m²/an [10].

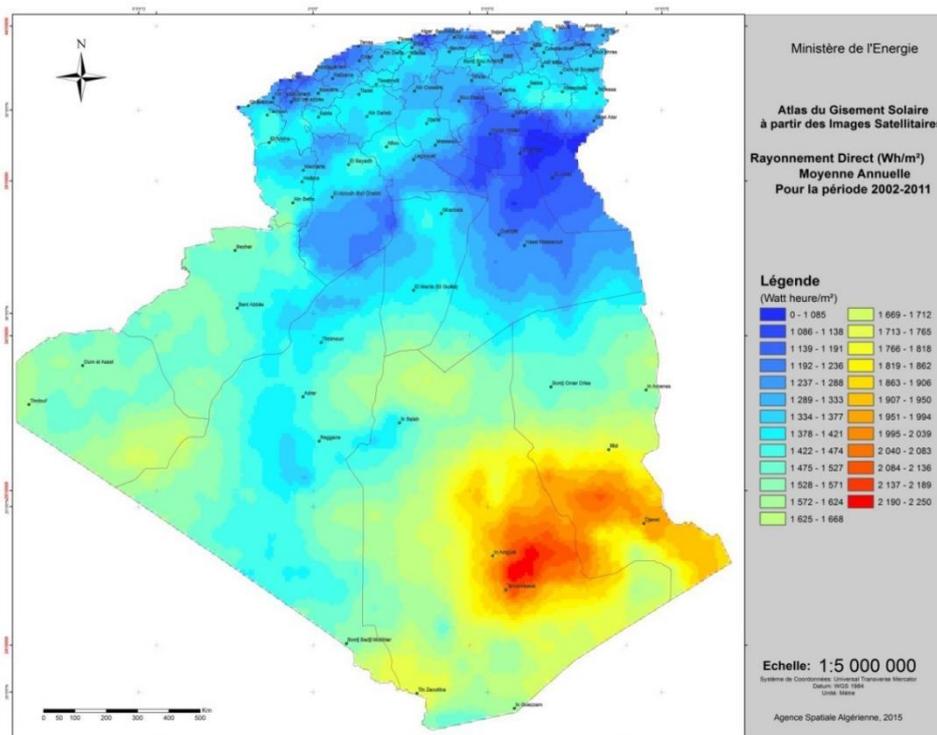


Figure (I.4) : Carte de l'Irradiation Globale Directe Annuelle Moyenne en Algérie

I.3.5- Système PV Raccordé au réseau :

Contrairement aux systèmes en site isolé ce système s'installe sur un site raccordé au réseau, généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement. L'énorme avantage de cette solution est l'absence de système de stockage. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement dans le réseau local ou national figure (I.5).

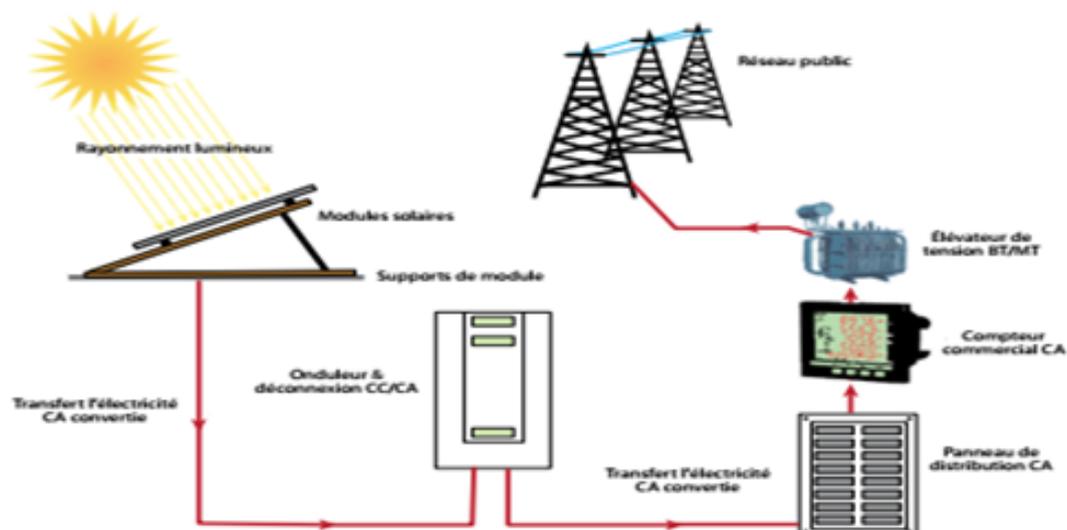


Figure (I.5) : Schéma d'une installation photovoltaïque raccordé au réseau.

I.3.5.1 - Installations photovoltaïques réalisées en Algérie

La première étape de la réalisation du Programme national des énergies renouvelables a été la création de 24 centrales photovoltaïques raccordées au réseau pour produire de l'énergie propre d'une capacité maximale de 354,3 mégawatts.

Table (I.1) présente les centrales PV et éoliennes réalisées en Algérie depuis l'année 2013 et son cumule de production jusqu'à l'année 2017 et ses gains en Gaz et en Dollar.

Tableau (I.1) : Les centrales Photovoltaïques et éoliennes réalisées en Algérie (2013- 2017) [12]

Les Centrales PV	Cumule production De2013 à 2017	Gain en gaz (m ³)	Gain en \$
Adrar	78050475	29322830,3	2905616,4
Kabertane	12378600	4650523,13	9444,87
Tindouf	12744750	-	5627562,9
ZaouiatKounta	20878800	7843969,06	777263,5
Reggane	16748940	6292419,45	623519,54
Timimoune	32477250	12201397,7	1209043,6
Aoulef	17059140	6408958,67	635067,48
Sedretleghzel	58509915	21981625,5	2178172,1
AinSkhouna	39290373	14761024,1	1462678,5
Sidibelabes	17307492	6502250,92	644311,86
Labiadhsidicheikh	39456210	14823327,5	1468852,2
Ouednechou	5594085	2101645,19	208253,26
Djanet	13434240	-	4553869,0
Tamanrasset	47531190	-	16217875,
Insalah	16498183	6198212,4	614184,51
Ouedelkebrit	41131200	15452605,5	1531207,7
Ainel bel	72571988	27264614,0	2701666,6
Lekhneg	107990700	40571091,7	40202013
Ainelmelh	35062000	13172464,0	1305267,2
Elhdhira	38073000	14303668,5	1417358,9
Totalphotovoltaïque	722788500,5	24385262,8	50562807
Kabertanéolienne	57942000	21768265,1	2157030,1
Total EnR	780730500	265620893,	52719838

I.3.6- Système éolien [13]

Son objectif est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Il est composé d'une éolienne (générateur éolien) et de batteries avec régulateur de charge.

Dans ce travail, nous utiliserons une éolienne horizontale à trois pales à rotation rapide. C'est la machine la plus utilisée aujourd'hui en raison de son rendement élevé par rapport à toutes les autres machines et de sa conception simple. De plus, ces éoliennes peuvent suivre la direction du vent et sont silencieuses. Cet aérogénérateur est composé de figure (I.7) :

1. les pales : ce sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor. Ils peuvent être fabriqués en bois, en lamellé-collé, en alliages d'aluminium ou en matériaux composites.
2. Le moyeu : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation. C'est en général, une pièce d'acier moulée.
3. L'arbre primaire (ou arbre lent) : il relie les pales au multiplicateur.
4. Le multiplicateur : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
5. L'arbre secondaire : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
6. Le générateur électrique : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
7. Le mât : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mât a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales. IL est fixé au sol grâce à des pylônes en acier ou en béton armé. Ces supports peuvent être autoporteurs, haubanés, rabattables, carénés ou à treillis. Les fondations sont en béton armé.
8. Le système d'orientation de la nacelle : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
9. Le système de refroidissement : il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.
10. Les outils de mesure du vent : la girouette pour la direction et les anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.
11. Le système de contrôle électronique : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.
12. Au pied du mât se trouve un transformateur.

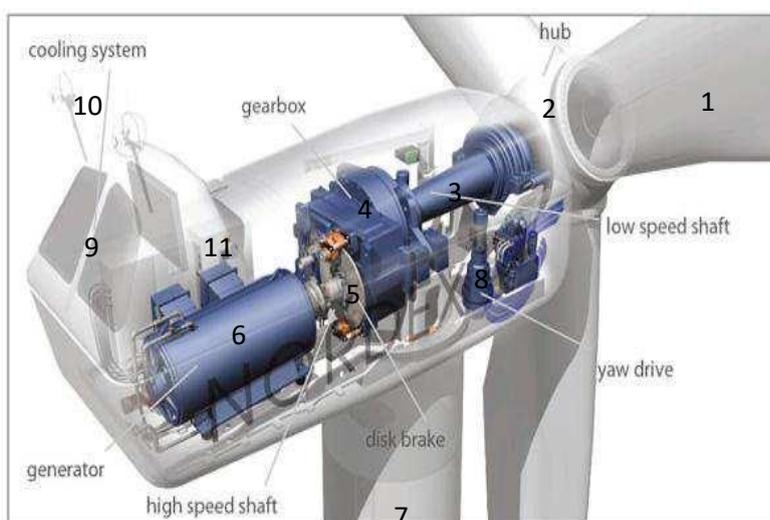


Figure (I.7): Les composants de l'aérogénérateur.

Le système éolien est non polluant et constitue un bon complément du système photovoltaïque. Il est bien adapté pour les sites isolés ventés. Cependant, certaines limites sont à prendre en considération :

- **La sécurité** : le mât doit être robuste et l'éolienne bien fixée pour éviter les accidents. Dans les régions froides, la glace peut s'accumuler sur les pales des éoliennes, causer de fortes vibrations et être projetée à grande distance. De même l'obligation, pour le propriétaire ou les personnes chargées de l'entretien, de grimper sur les tours des éoliennes peut engendrer un risque. Il faut également prendre des précautions particulières pour que les enfants n'aient pas accès à l'installation.
- **Le coût** : il reste encore élevé en comparaison avec celui des panneaux.
- **Climat extrême** : dans certaines parties du pays, le climat extrême met les systèmes éoliens à rude épreuve et de telles conditions sont susceptibles d'engendrer des problèmes de fonctionnement et de durabilité.
- **Voisins** : avant de faire l'acquisition d'un système éolien, il faut discuter avec ses voisins de la présence d'une éolienne à proximité de chez eux. Ils risquent d'être préoccupés aussi bien par la taille du système que par le bruit qu'il produit.
- **Restrictions dues au zonage et à d'autres obstacles juridiques potentiels** : l'administration municipale doit pouvoir fournir les renseignements concernant les restrictions émises, quant au niveau sonore de l'installation et à la hauteur permise des tours, par exemple.
- **Faune ailée locale** : les systèmes de grande taille doivent être conçus de manière à ce que les oiseaux ne puissent s'y percher ou y construire leurs nids, et pour réduire au minimum les dangers potentiels qu'ils encourent, il faut éviter d'installer le système éolien sur un parcours migratoire ou à un endroit où de nombreux oiseaux font leurs nids ou se nourrissent.
- **Interférences électromagnétiques** : les systèmes éoliens produisent parfois des interférences électromagnétiques qui compromettent la réception des programmes radiophoniques ou de télévision. Ces problèmes sont habituellement causés par le générateur, l'alternateur ou des pales métalliques. On peut remédier à la situation en installant des pièces blindées, munies de filtres, ou fabriquées en bois, en plastique ou en fibre de verre.
- **Connaissances techniques et entretien** : le propriétaire doit assurer l'entretien du système éolien de façon régulière pour en augmenter la durée de vie du système et approcher une longévité proche de celle des panneaux.
- **Propriété** : Les assurances, les normes de construction et les restrictions aux actes de propriété sont autant de facteurs dont il faut également tenir compte. [14]

I.3.6.2- Potentiel éolien en l'Algérie :

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien. La carte de la figure (I.8) montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans 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, Arzew, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret ainsi que dans la région délimitée par Bejaïa au Nord et Biskra au Sud [15].

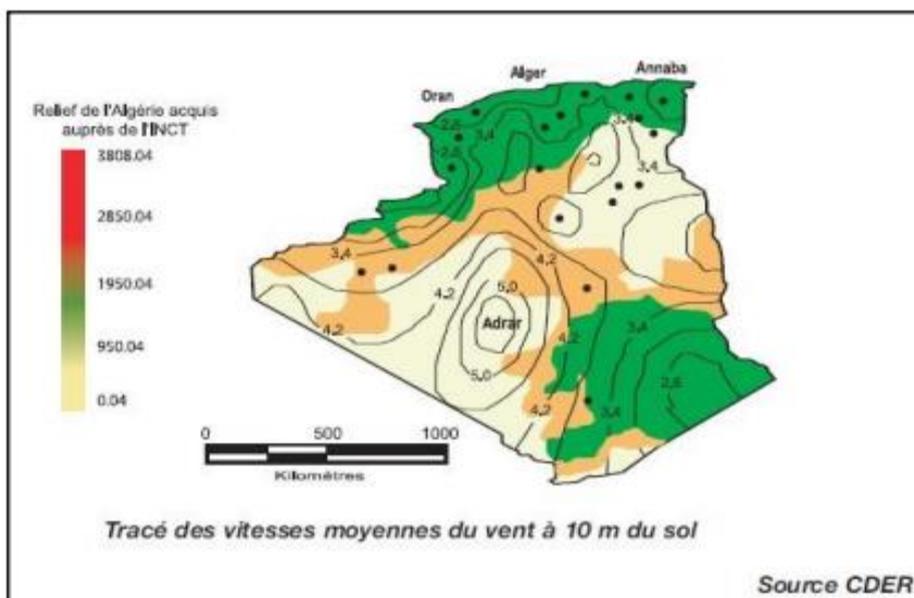


Figure (I.8) : La vitesse moyenne du vent au niveau l'Algérie.

I.3.6.3- Centrales éoliennes réalisées en Algérie :

En Algérie, une première ferme éolienne de 10 MW de puissance a été implantée à Adrar et mise en service en juin 2014. L'énergie électrique fournie par cette ferme est injectée au réseau local et le taux de pénétration de l'énergie éolienne représenterait 5% environ. [16]



Figure (I.9) : Eolienne d'Adrar.

I.4- Réseaux électrique

I.4.1- Description du réseau électrique :

Le réseau électrique est un ensemble d'infrastructures qui permettent le transport de l'énergie électrique des centrales de production vers les consommateurs. Il est constitué de lignes électriques

fonctionnant à différents niveaux de tension, reliées entre elles par des sous-stations électriques qui permettent de distribuer et de faire passer l'électricité d'une tension à une autre grâce à des transformateurs. Le réseau électrique doit également assurer la gestion dynamique de l'ensemble du processus de production et de transport. Les ajustements de mise en œuvre de la consommation visent à assurer la stabilité de l'ensemble [17].

Les connexions internationales aux réseaux électriques deviennent de plus en plus importantes dans le monde, accompagnées d'un intérêt croissant pour l'énergie électrique. [18]

Actuellement, presque tous les équipements des réseaux électriques produisent et distribuent du courant de distribution alternatif triphasé. Les transformateurs augmentent la tension générée par les générateurs tout en réduisant l'ampérage, ce qui contribue à réduire les pertes de puissance active dues à l'effet Joule.

L'augmentation de la consommation d'énergie électrique a accru la demande sur le système de distribution, où le souci n'est pas seulement de servir plus de clients, mais aussi de fournir des équipements qui nécessitent plus d'attention aux variations de tension et de réduire les interruptions de service [19]. Le système électrique peut être séparé en quatre fonctions principale voire figure (I.10) :

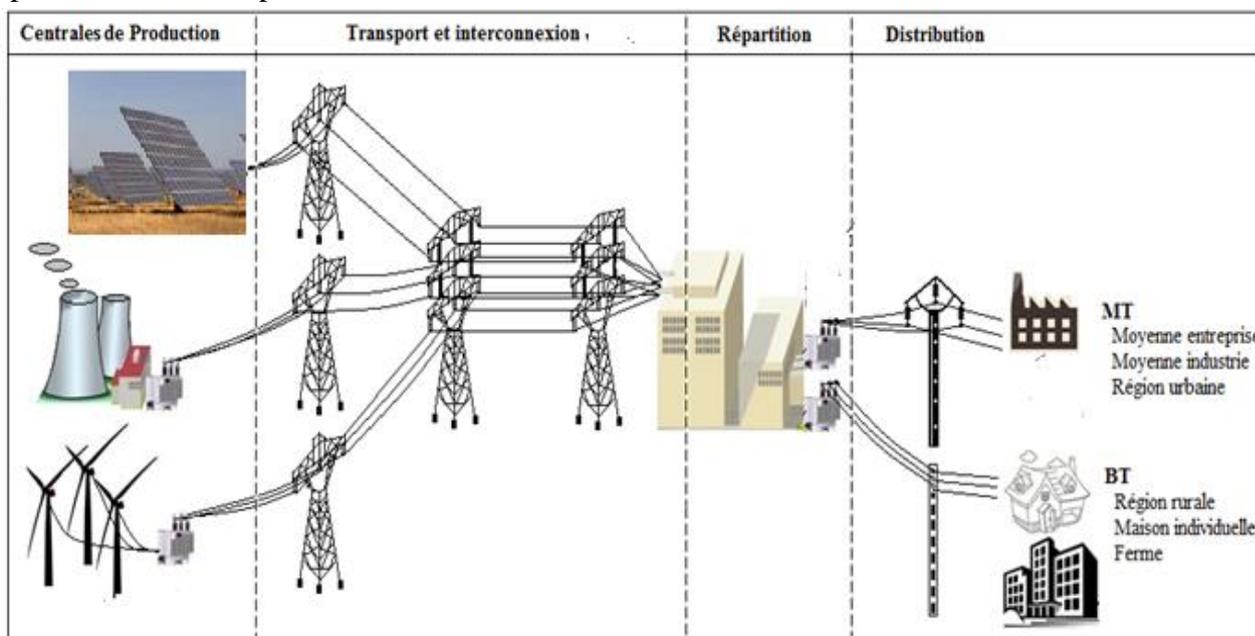


Figure (I.10) : architecture d'un réseau électrique.

I.5- La stratégie de gestion des systèmes hybrides [20]

L'organigramme de gestion d'énergie des systèmes multi sources est un élément très essentiel pour la qualité et les performances de ces systèmes. Toutefois pour un fonctionnement rigoureux d'un organigramme de gestion demande un système de contrôles. Alors il existe plusieurs modèles de contrôles, utilisés actuellement, ils dépendent de la configuration, de la complication et de l'efficacité du système hybride à gérer.

I.5.1- Contrôle centralisé : [21]

Un système de contrôle d'accès centralisé, c'est un système unifié pour tous vos sites, même s'ils se trouvent dans des pays différents. Vous disposez d'une politique de sécurité globale applicable à tous vos sites, et votre système est géré de manière automatisée comme il est présenté sur la figure (I.11).

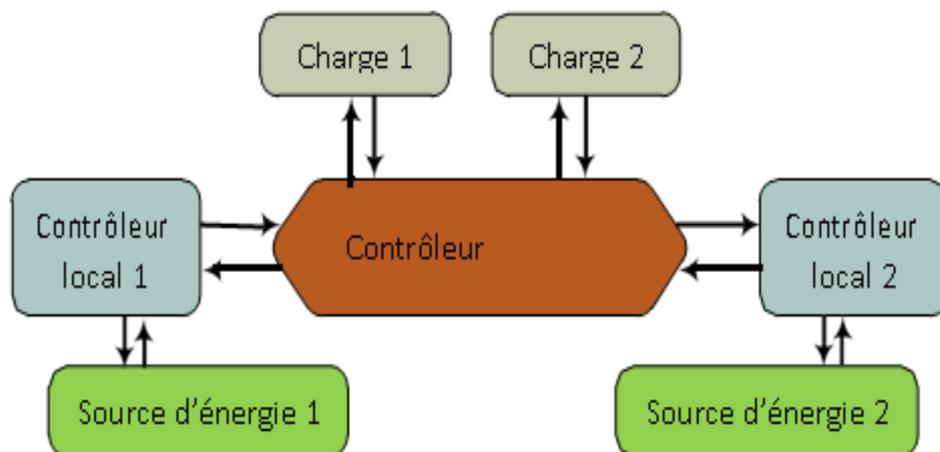


Figure (1.11) : Stratégie de gestion d'énergie centralisée.

I.5.2- Contrôle distribué :

Un système de contrôle distribué ou DCS (distributed control system) ou encore système numérique de contrôle-commande (SNCC) est un système de contrôle industriel destiné aux usines ou procédés industriels dont les éléments de commande sont distribués ou géo-répartis comme il est illustré sur la figure (I.12). [22]

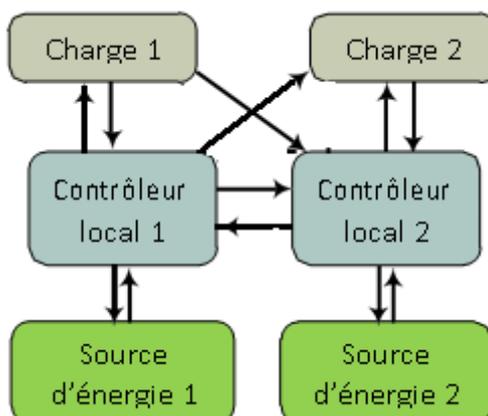


Figure (I.12) : Stratégie de gestion d'énergie distribuée.

I.5.3 - Contrôle hybride centralisé et distribué :

Un schéma plus pratique est le contrôle hybride qui combine les schémas de contrôle centralisé et distribué, comme l'indique la Figure (I.13). Les sources d'énergie sont regroupées dans un micro-réseau, le contrôle centralisé est utilisé au sein de chaque groupe, tandis que le contrôle distribué est appliqué à un ensemble de groupes. Avec un tel système de gestion de d'énergie hybride, l'optimisation locale est obtenue via un contrôle centralisé au sein de chaque groupe, tandis que la coordination globale entre les différents groupes est assurée par un contrôle distribué. De cette façon, le temps de calcul de chaque contrôleur est réduit et les problèmes de défaillance en un seul point qui provoquant l'arrêt du système complet sont atténués. [23]

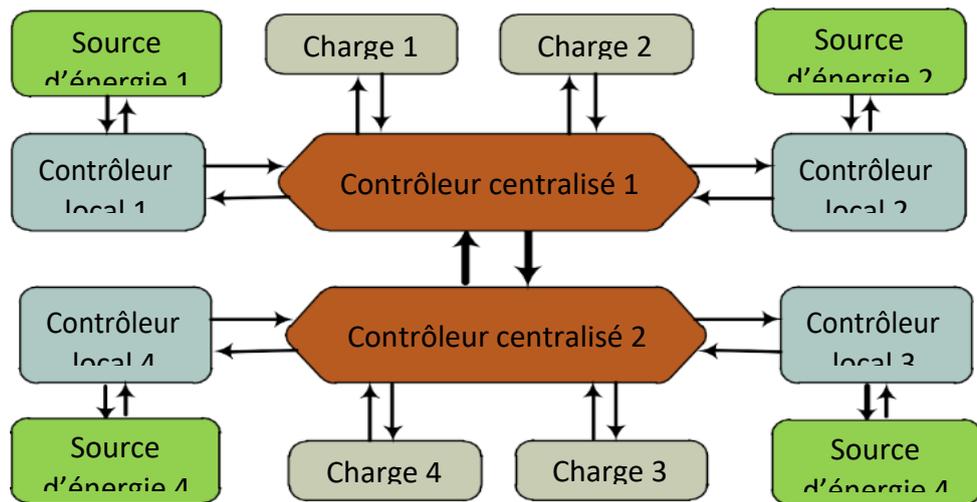


Figure (I.13) : Stratégie de gestion d'énergie hybride centralisée et distribuée.

I.6 - Méthodes de dimensionnement

Les techniques de dimensionnement de systèmes hybrides peuvent être classées en techniques classiques, techniques modernes et outils logiciels. Les techniques classiques utilisent des méthodes de construction itératives, numériques, analytiques, probabilistes et graphiques. Les technologies modernes utilisent des méthodes synthétiques et hybrides. Ces méthodes peuvent déterminer la taille optimale du système et obtenir une meilleure convergence et une plus grande précision dans la recherche de l'ensemble des solutions optimales. Cette dernière technologie s'appuie sur le logiciel le plus utilisé pour le dimensionnement de systèmes hybrides autonomes, Homer. Un bref aperçu des méthodes d'amélioration et de mise à l'échelle des logiciels est fourni. [24]

I.6.1 - Méthode de dimensionnement par logiciels

Les logiciels de simulation sont les outils les plus courants pour évaluer les performances du système énergie hybride. En utilisant la simulation, le dimensionnement optimal des composants d'un système hybride peut être déterminé en comparant les performances techniques et le coût d'énergie (COE) pour différentes configurations du système. Plusieurs outils logiciels sont disponibles tels que ; HOMER, HYBRID2, IHOGA, HYBRIDS, RETSCREEN. Dans ce qui suit, nous présenterons les logiciels les plus utilisés dans l'optimisation de dimensionnement des systèmes d'énergie hybrides.

I.6.2 – HOMER

HOMER (Hybride Optimisation Model for Electric Renewables) développé par (NREL) laboratoire national des énergies renouvelables. Il est le logiciel d'optimisation le plus utilisé pour les systèmes hybrides. Il est capable d'optimiser les systèmes hybrides constitués d'un générateur photovoltaïque, des batteries, des éoliennes, des turbines hydrauliques, des générateurs à courant alternatif, les piles à combustible, des électrolyseurs, des réservoirs d'hydrogène, des convertisseurs bidirectionnel, et les chaudières. Les charges peuvent être des charges AC, DC et/ou d'hydrogène, ainsi que des charges thermiques. Ces logiciels peuvent simuler toutes les configurations de système possibles et affichent une liste de systèmes réalisables, triés par le coût de cycle de vie. Donc, on peut aisément trouver le système le moins coûteux et analyser la liste pour enquêter sur d'autres systèmes possibles. Homer est un modèle de séries chronologiques et effectue un bilan énergétique horaire le long d'une année pour chaque configuration de système rentrée par l'utilisateur. Il affiche ensuite la liste de configuration de système trié par le coût actuel net.

I.7- Les critères d'évaluation d'un système hybride [25]

I.7.1-Critères et indicateurs :

La première étape de l'évaluation d'un système hybride consiste à identifier des critères et des indicateurs qui reflètent les objectifs et les préférences des parties prenantes, telles que les clients, les investisseurs, les régulateurs ou les communautés. Les critères sont les grandes catégories qui mesurent la performance ou l'impact d'un SH, comme la fiabilité, l'efficacité, le coût, les émissions ou l'acceptabilité sociale. Les indicateurs sont des mesures spécifiques qui définissent des critères tels que la disponibilité, le facteur de capacité, le coût actualisé de l'énergie, l'intensité des gaz à effet de serre ou la satisfaction des clients. Selon le contexte et la portée de l'évaluation

I.7.2-Simulation et optimisation du système hybride :

La deuxième étape de l'évaluation HRES consiste à simuler et à optimiser la configuration et le fonctionnement du système à l'aide de modèles mathématiques et d'outils logiciels.

-Le calcul du nombre optimal des modules photovoltaïques et des batteries a été basé sur le concept de la probabilité de perte d'énergie (Perte d'alimentation électrique Probabilité 'LPSP'), et sur l'économie du système.

I.7.3-Analyse de sensibilité et d'incertitude :

La quatrième étape d'une évaluation HRES consiste à effectuer une analyse de sensibilité et d'incertitude qui évalue la force et la fiabilité des résultats et des recommandations de l'évaluation. L'analyse de sensibilité est une technique qui étudie la manière dont les résultats de l'évaluation changent lorsque les paramètres d'entrée, tels que les coûts, les prix, les incitations ou les pondérations, varient dans une plage ou une distribution donnée.

I.7.4-Validation et vérification :

La cinquième étape de l'évaluation du HRES consiste à valider et vérifier les résultats et les recommandations de l'évaluation à l'aide de données empiriques et de retours d'expérience du terrain. La validation est le processus consistant à vérifier si les résultats de l'évaluation et les recommandations sont cohérents et précis avec les performances et l'impact réels du HRES à l'aide de données mesurées ou observées, telles que la production d'énergie, la consommation d'énergie, les émissions ou la satisfaction des clients.

I.8-Objectif de mémoire :

L'objectif principal de notre mémoire de fin d'étude est de constater et compléter le dimensionnement optimal de la ferme éolienne à mécheria sud-ouest de l'Algérie conçu par [26]. Afin de la connecter à la centrale photovoltaïque de Naâma, et concevoir un système hybride raccordé au réseau. Afin d'accroître la pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale d'énergie électrique en Algérie, de réduire la pollution et d'améliorer la desserte énergétique dans la région du sud :

- Pour bien faire notre démarche sera comme suit :

Estimer correctement le potentiel énergétique renouvelable sur un site donné.

- ✓ Vérifier et apprendre la Simulation du système éolien raccordé au réseau au niveau de la région de mécheria on utilisant le logiciel Wasp.
- ✓ Evaluer le dimensionnement de la centrale photovoltaïque de Naâma.
- ✓ Etudier la faisabilité et simuler un système hybride éolien-photovoltaïque relier au réseau proposé sur la figure(I.14) par le logiciel HOMER.

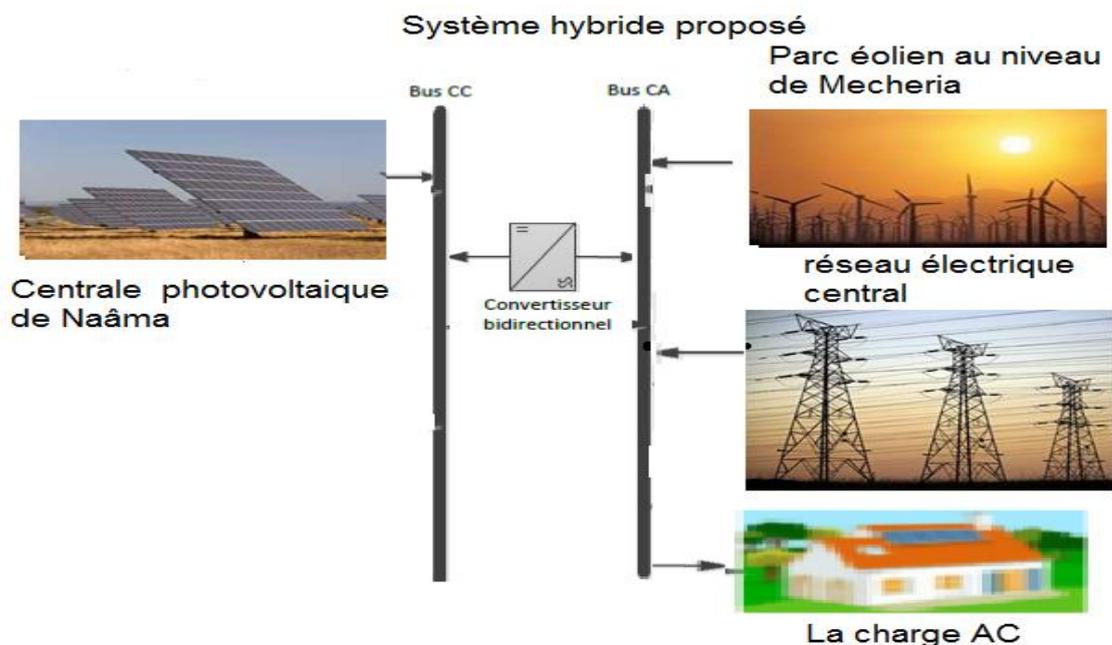


Figure (I.14) : Montre le système multi sources proposé pour la conception dans cette région de (Naâma - MECHERIA).

I.9- Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu des énergies renouvelables en Algérie. Il illustre différentes étapes du développement national des énergies renouvelables (2011/2035), à travers lesquelles nous avons appris beaucoup de connaissances sur le développement de cette technologie en Algérie.

Ce chapitre présente d'une part les différents concepts impliqués dans la conception de deux sources d'énergie : le solaire photovoltaïque et l'éolien. D'autre part, une présentation de tous les éléments constitutifs des systèmes photovoltaïques et éoliens, ainsi que leurs principes de fonctionnement, permettant une introduction à l'analyse des systèmes hybrides.

La définition du système hybride, les différentes applications de ce type de système et les systèmes de contrôle de gestion sont décrits.

La dernière section de ce chapitre est consacrée à la présentation des méthodes et logiciels de dimensionnement utilisés pour déterminer la taille d'une unité de production hybride connectée au réseau pour l'énergie éolienne et solaire.

Ce chapitre nous aidera de fixer les objectifs de notre travail et de dessiner un schéma du système proposé. Le chapitre prochain sera donc consacré à la modélisation des différents composants de notre système hybride.

Chapitre II

Évaluation du dimensionnement et du fonctionnement des éléments du système hybride pour l'étude énergétique

II.1- Introduction

L'étude des systèmes énergétiques à sources renouvelables nécessite d'évaluer le potentiel énergétique primaire sur la base des données météorologiques disponibles telles que l'intensité du rayonnement solaire par rapport au potentiel solaire, ainsi que la vitesse et la direction du vent par rapport au potentiel éolien. [27]

Les données récoltées nécessitent un traitement particulier pour qu'ils soient adaptés aux modèles choisis, par exemple :

- ✓ La vitesse du vent est généralement mesurée à une hauteur de 10 mètres au-dessus du sol alors qu'il faut la connaître à la hauteur du moyeu de la turbine éolienne ce nécessite des interpolations.
- ✓ L'éclairement solaire global est mesuré sur des plans horizontaux tandis que les panneaux photovoltaïques sont dans la plupart des cas inclinés par rapport au plan horizontal.

L'influence du potentiel énergétique primaire sur le comportement du système et sur sa structure même intervient de deux manières :

- ✓ Par sa quantité, il intervient sur la productivité de chaque sous-système (éolien, photovoltaïque) ;
- ✓ Par leur répartition temporelle et leur complémentarité ;
L'absence de soleil s'accompagne souvent de la présence de vent et vice versa. Ainsi, la combinaison de l'énergie éolienne et solaire augmente le temps de pénétration des énergies renouvelables.

Ainsi, si cette complémentarité est parfaite entre ces deux sources pour un site, cela signifie que le système hybride réalisé peut être autonome du réseau électrique et peut également fonctionné sans stockage.

A cet effet, le travail proposé dans ce mémoire consiste à vérifier la faisabilité hybridation de la centrale photovoltaïque de 20 MW, située à Naâma au sud-ouest de l'Algérie, avec un parc éolien dimensionné au niveau de la région de Mécheria par l'auteur [Amrani et all]. Afin de parvenir à un système hybride optimal connecté au réseau et d'améliorer la production d'énergie électrique propre. Afin d'étudier la faisabilité du système conçu et de déterminer la configuration optimale du système hybride proposé (PV + éolienne + réseau) par le logiciel HOMER, nous consacrerons ce chapitre à l'évaluation du dimensionnement et du fonctionnement individuel de chaque source. Une étude sera réservée à l'évaluation et l'apprentissage de conception du site éolien et l'acquisition des techniques d'analyse des paramètres d'énergie éolienne. La deuxième sera dédié l'appréciation du dimensionnement de la centrale photovoltaïque installée à NAÄMA en service depuis 2017.

II.2- Description des données météorologiques de la zone :

Tableau (II.1): les données météorologiques et Coordonnées géographiques des sites Mécheria et Naâma

Site	Mécheria	Naâma
Longitude	-0.2762	-0.905662
Latitude	33.544	33.435061
Période de mesure	01/01/2005-31/12/2015	01/01/2005-31/12/2015
L'irradiation solaire sur le plan horizontal (G, kWh/m ²)	4.64	5.18
La vitesse de vent sur 10m V10, m/s	6.8	6.3
La température ambiante (Ta, °C)	15.84°	16.94°
La pression atmosphérique (pat, hPa)	1021	1015

- ❖ Les données ont été utilisées pour évaluer les variations mensuelles et saisonnières de la vitesse moyenne du vent et du profil vertical de la vitesse du vent, ainsi que pour évaluer l'énergie éolienne et le potentiel énergétique.

II.3--Analyse de la conception du site éolien de Mécheria :

L'énergie éolienne est considérée comme la deuxième énergie renouvelable utilisée après l'énergie solaire grâce à son impact environnemental faible.

II.3.1- Modélisation du système éolien : [28]

Pour estimer la puissance produite par les générateurs éoliens, on utilise la courbe de puissance caractéristique. Cette courbe permet de connaître la puissance produite à partir de la vitesse du vent. Elle est spécifique pour chaque aérogénérateur. Les paramètres caractéristiques de chaque courbe de puissance sont

- V_{eut-in} : *vitesse d'enclenchement.*

- V_{rated} : *vitesse pour laquelle la puissance nominale est obtenue.*

- $V_{eut-off}$: *vitesse de déclenchement.*

- P_{rated} : *puissance nominale.*

La modélisation d'un système éolien passe par plusieurs étapes, la plus importante est la récolte des données de vent d'un site donné. La base de données obtenue doit être traitée par différentes méthodes mathématiques ou bien l'utilisation des logiciels de modélisation. Cependant cette modélisation est répartie en deux volets principaux.

- ✓ Le premier concerne les principes mathématiques d'extrapolation du vent tel que l'extrapolation verticale de la vitesse du vent, l'extrapolation verticale des paramètres de Weibull, l'extrapolation temporelle et l'extrapolation horizontale et sillage. La détermination de la direction dominante du vent appelée « rose des vents » et l'évaluation de la densité moyenne de l'énergie éolienne pour estimer l'énergie éolienne sont nécessaires. L'extrapolation verticale du vent peut aussi être réalisée avec le logiciel WAsP.
- ✓ La deuxième section traite de diverses techniques de modélisation mathématique des courbes de puissance des éoliennes. Car le modèle théorique de la courbe énergétique présenté par les constructeurs ne correspond pas souvent à la courbe réelle présentée par les utilisateurs.

II.4 - Dimensionnement d'un site éolien : [29]

Selon notre premier constat, les critères initiaux de sélection des sites sont principalement la disponibilité de bases de données éoliennes et une forte consommation d'énergie, ce qui pose de nombreux problèmes au réseau électrique central. Cette localisation est justifiée par la présence de plusieurs conditions favorables telles que la proximité de la centrale photovoltaïque de NAAMA, la présence d'une station météorologique pour mesurer la vitesse du vent et les perturbations du réseau central. Elle commence par l'analyse statistique des mesures et la détermination de la vitesse moyenne du vent. Les données utilisées en termes de vitesse et de direction du vent ont été enregistrées à 10m de hauteur, au niveau du réseau de l'Office Nationale de la Météorologie. Les nouvelles données de vent enregistré à Mécheria dans l'extrême ouest montre une vitesse de vent moyenne très prometteuse de 5,6 m/s dans la direction dominante Sud-est.

II.4.1- Détermination du potentiel de site par le logiciel WAsP

II.4.1.1- Résultats d'évaluation du potentiel du site et discussions :

II.4.1.1.1- Comportement de la vitesse moyenne du vent :

Le potentiel éolien du site répertorié nommé Mécheria a été examiné de 2011 à 2021. Les vitesses moyennes du vent mensuelles et annuelles sont calculées et illustrées dans les figures (II.1) et (II.2).

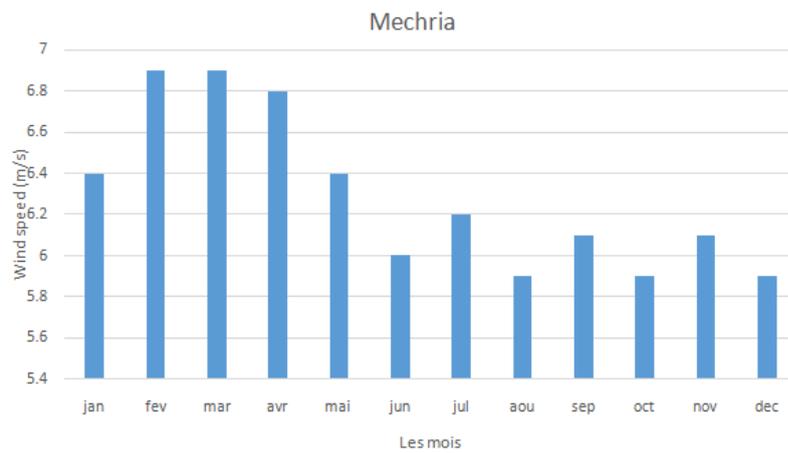


Figure (II.1) : variations moyennes mensuelles de la vitesse du vent

Tableau (II.2) : Vitesse moyenne mensuelle en m/s.

Mois	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	out	Sep	Oct	Nov	Dec
Site												
MECHRIA	6.38	6.91	6.90	6.81	6.44	6.09	6.25	5.83	6.18	5.82	6.14	5.83

- ❖ La vitesse mensuelle moyenne du vent pour le site de Mécheria varie entre 5,8 m/s et 6,91 m/s, comme le montre le graphique de la figure (II.1) et du tableau (II.2). De plus, la vitesse maximale du vent peut être estimée pour la plupart des sites, tel qu'il est enregistré au cours des mois de février, mars et avril, tandis que les valeurs les plus basses peuvent être trouvées au cours de différents mois, notamment en octobre et décembre. Cela indique que la valeur la plus acceptable pour la vitesse moyenne du vent se produit dans cette ville avec une différence acceptable de 5,38 m/s et 6,91 m/s pendant tous les mois de l'année. L'analyse de la vitesse mensuelle moyenne montre que les vents de Mécheria sont adaptés à la construction d'un système d'énergie éolienne pouvant fonctionner toute l'année.

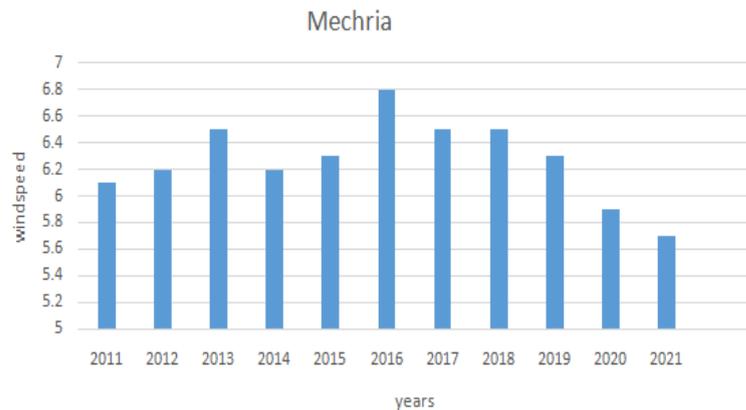


Figure (II.2): variation annuelle moyenne de la vitesse du vent.

Tableau (II.3) : Vitesse Moyenne annuelle en m/s.

Année	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Site											
MECHRIA	6.13	6.32	6.51	6.31	6.42	6.81	6.59	6.61	6.33	5.87	5.57

- ❖ La figure (II.2) montre l'analyse de la vitesse moyenne du vent pour le site d'études pendant une période de 10 ans. Le graphe indique que la variation par ans de la vitesse moyenne du

vent pour Mécheria est comprise entre 5.57 m/s et 6.81 m/s, une fluctuation acceptable et sa valeur minimale facilite le choix des turbines éoliennes. Par conséquent, cela indique que la région de Mécheria assure une marge de vitesse du vent moyen la plus important pour l'exploitation éolienne.

II.5- Comparaison de la densité de L'énergie éolienne et de la vitesse moyenne du vent :

Les figures (II.3) et (II.4) présentent les variations journalières et annuelles de la densité de puissance et la vitesse moyenne du vent estimées du site étudié. [30]

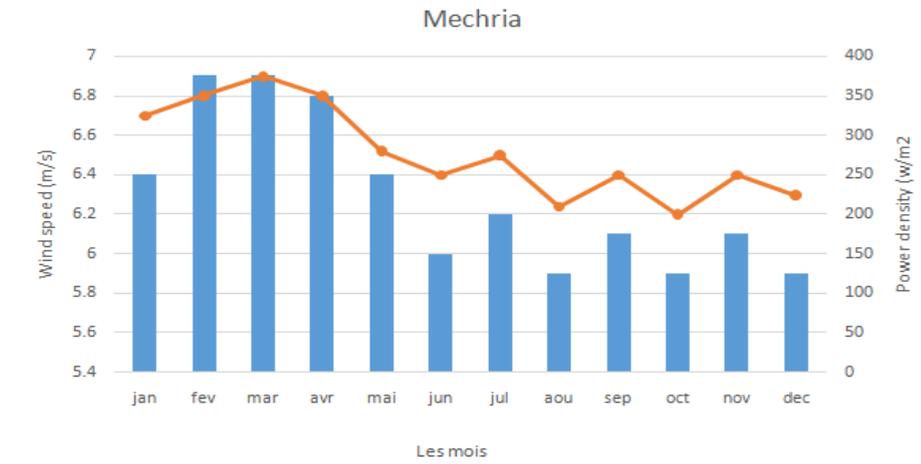


Figure (II.3) : Comparaison des variations mensuelles de la densité de l'énergie éolienne et de la vitesse moyenne du vent.

-Tableau (II.4): les bornes de la production d'énergie du mois

Site	Grandeur	Max	Min
Mécheria	Vitesse m/s	7.2	5.82
	P(v) w/m ²	384	210

- ❖ La figure (II.3) montre que la densité de puissance et la vitesse moyenne mensuelles sont maximales pour le site de mécheria pendant les mois de février, mars et avril.. Alors que même pour les autres mois de l'année on remarque que les fluctuations de la vitesse et de la densité de puissance restent très stables avec des valeurs acceptables. Le tableau (II.4) illustre les valeurs minimales et maximales de site étudié.

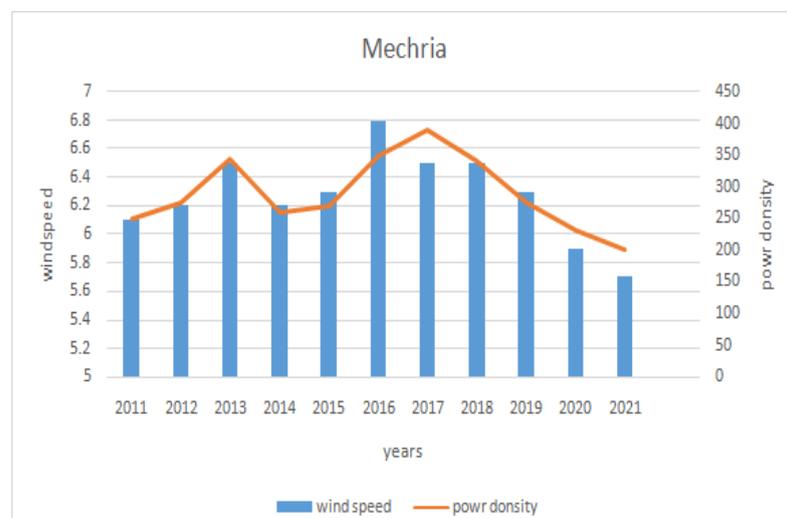


Figure (II.4): Comparaison de variations annuelles de la densité de l'énergie éolienne et de la vitesse moyenne du vent.

Tableau (II.5) : les bornes de la production d'énergie annuelle

Site	Grandeur	Max	Min
Mécheria	Vitesse m/s	6.81	5.57
	P(v) w/m ²	332	210
	E(v) wh	2908320	1839600

- ❖ La Figure (II.4) et le Tableau (II.5) montrent la variation annuelle de la densité de puissance présente comme image de la variation annuelle moyenne de la vitesse du vent avec des valeurs très significatives au niveau du site de Mécheria. Les valeurs les plus élevées et les plus constantes de P(v) et E(v), qui variait respectivement entre 210 W/m² - 375 W/m² et 1839600 Wh - 2908320Wh, au cours de la période d'étude. Ces résultats montrent clairement que le site de Mécheria possède une zone plus ventée et peut générer une énergie très importante.

II.6- Directions dominantes du vent (Roses de vent)

- Direction du vent dominant (Rose des vents) :

L'évaluation de la direction du vent permet d'exposer l'influence des facteurs géographiques sur le vent afin de déterminer la direction et la force du vent dominant les plus courantes. Des roses des vents ont été créées pour le site de Mécheria à l'aide du logiciel WASP. La figure (II.5) montre le diagramme polaire de la direction annuelle du vent. Ce diagramme affiche la fréquence de la vitesse du vent en fonction de 16 secteurs de fréquence. Chaque secteur représente un intervalle d'allant de 1° à 380° de la direction de la vitesse du vent. On observe que la direction du vent dominant varie d'un endroit à l'autre ainsi qu'au sein d'un même en droit. [31]

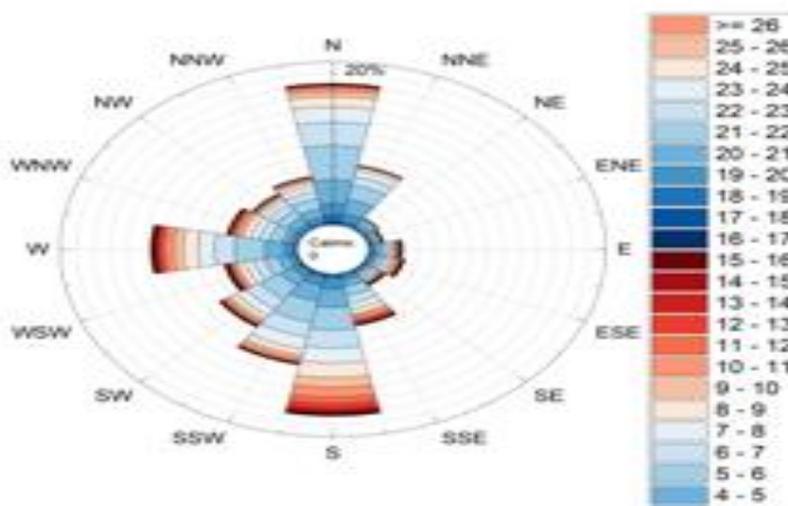


Figure (II.5) : Rose des vents annuelle de Mécheria

- ❖ -L'analyse des modèles montre que les directions dominantes des vitesses du vent venant du côté sud de la région de Mécharia sont les plus réactives. Nous avons observé que les tendances les plus courantes pour l'emplacement des Mécharia sur la figure (II.5) sont très stables, ce qui fournit une bonne indication en faveur de la plantation d'éolienne.

-Cartographie

Comprise entre 5 m/s et 6,8 m/s et peut atteindre 11 m/s dans les zones montagneuses avec une densité de puissance comprise entre 60 W/m². Et 350 W/m². Le facteur de forme k varie de 1,10 à 2,11 dans toute la zone. D'autre part, l'ouest de la région correspond aux vitesses les plus élevées, ce qui pourrait être un bon emplacement pour installer un parc éolien, en tenant compte d'éviter les endroits montagneux de la région avec une altitude supérieure à 1 100 m. Selon la carte des vents de la région de Mécheria, une grande partie de la région est balayée à une vitesse

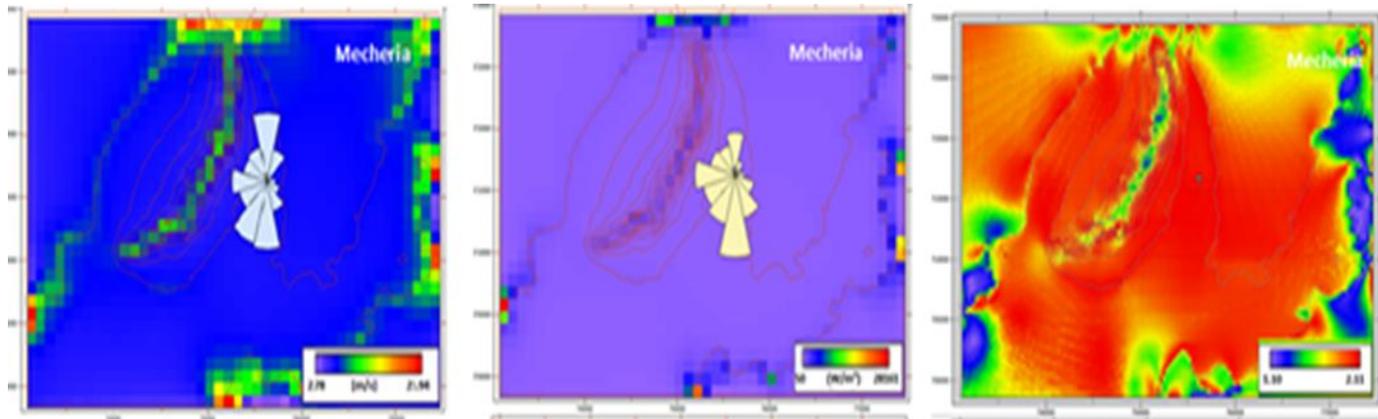


Figure (II.6) : Cartographie de site de mécheria

A: Vitesse moyenne du vent et fréquence du vent observée pour mécheria

B: Densité de puissance et densité de rose pour mécheria

C: Paramètre k de Weibull pour mécheria

II.7-Conception d'un parc éolien de 20 MW à Mécheria : [32]

En fonction des résultats d'entraînement obtenus dans la première partie de l'analyse en faveur du site de Mécheria, la deuxième partie de cette analyse porte sur la conception d'un parc éolien à cet endroit avec une énergie capacité de 20 MW et analyser sa faisabilité. Il s'agit de se connecter à la centrale photovoltaïque NAAMA (GPVN) de 20 mégawatts en service depuis 2017 et de créer un système multi-sources pour améliorer la qualité de service du réseau électrique central et augmenter la capacité de pénétration des énergies renouvelables.

II.7.1- Description de l'éolienne choisie :

Nous avons choisi d'utiliser la turbine Power Wind 2MW, sa caractéristique de puissance en fonction de la vitesse est représentée dans la figure (II.7) : notre choix est motivé par l'étude comparative réalisée par les chercheurs Salah et all en 2020 pour la zone d'Arzew [SALAH] [33]

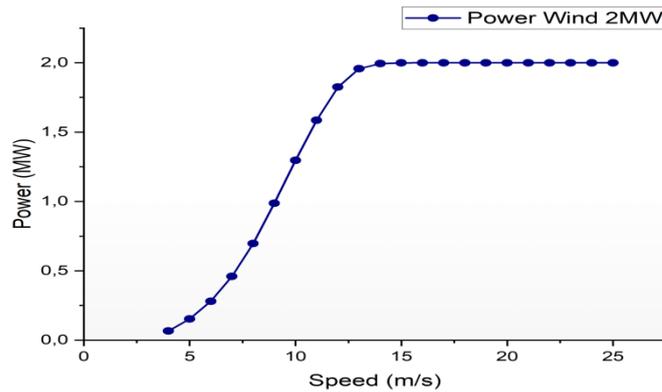


Figure (II.7) : Courbe de puissance de la turbine Énergie éolienne 2MW.

II.7.2- Configurations d'implantations des turbines :

Généralement l'implantation des turbines dans l'espace d'un site dépend de la direction dominante du vent, des obstacles et la topographie de la région. Il existe deux configurations très utilisées pour optimiser la production d'un parc éolien la configuration en une rangée et l'implantation en plusieurs rangées en parallèles.

II.7.3- Implantation a deux rangées avec couloir éolien :

Dans ce travail, nous avons choisi une configuration à deux rangées qui laisse un passage équidistant entre les deux éoliennes en cascade de la première rangée afin de minimiser l'impact du flux résiduaire sur les éoliennes de la deuxième rangée, comme le montre la figure (II.8). les éoliennes du site sont installées sur deux rangées face à la direction du vent dominant. Les résultats de simulation d'installation sont illustrés dans les tableaux (II.6) et (II.7), avec (v.y location) représentant les emplacements des éoliennes, (Elev. [m]) étant la hauteur de l'éolienne, (Ht [m]) est la hauteur de l'éolienne au-dessus du sol, (U[m/s]) est la vitesse du vent de chaque éolienne, (Brut [GWh]) est l'énergie totale générée annuellement, (Net AEP [GWh]) est l'énergie totale annuelle l'énergie nette produite et enfin (Perte%) est l'effet actuel, c'est à dire l'indice de perte de chaque éolienne. Il est à noter que la 11ème rose du vent illustré au-dessus des 10 éoliennes est l'emplacement du mat de mesure.

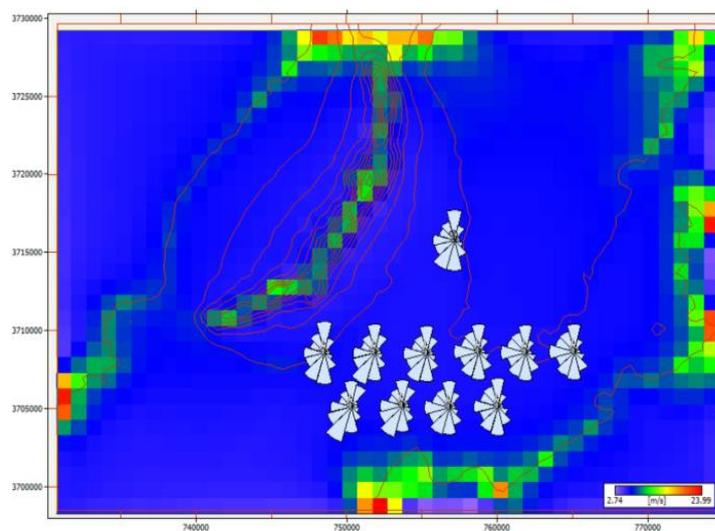


Figure (II.8) : Disposition des éoliennes (Énergie éolienne 2MW) sur la carte de production annuelle d'énergie (AEP) du site à 80 m au-dessus du niveau du sol.

.Tableau (II.6) : Paramètres de résultat produits par la ferme

Chapitre II : évaluation du dimensionnement et du fonctionnement des éléments du système hybride pour l'étude énergétique

Site description	X-locatio n [m]	Y-location [m]	Elev. [m]	Ht [m]	U [m/s]	Gross [GWh]	Net AEP [GWh]	Loos [%]
Turbine 01	760050,2	3705107	1120,8	80	9,65	10,603	10,584	0,18
Turbine 02	748528,6	3708564	1139,6	80	9,73	10,862	10,856	0,06
Turbine 03	756824,1	3705050	1082	80	9,5	10,443	10,424	0,18
Turbine 04	751869,9	3708564	1056,6	80	9,25	10,236	10,222	0,14
Turbine 05	755326,3	3708506	1069,6	80	9,27	10,215	10,194	0,2
Turbine 06	750314,4	3705107	878,7	80	9,29	10,239	10,228	0,11
Turbine 07	758782,8	3708621	1100	80	9,37	10,246	10,225	0,21
Turbine 08	761893,6	3708564	1100	80	9,41	10,257	10,239	0,18
Turbine 09	753713,3	3705165	1003,5	80	9,36	10,329	10,308	0,21
Turbine 10	765119,6	3708621	1111,7	80	9,58	10,479	10,471	0,08

Tableau (II.7): Résultats de simulation de la production annuelle totale du parc éolien

Variable	Total	Mean	Min	Max
Total Gross AEP[GWh]	103,91	10,391	10,215	10,862
Total net AEP[GWh]	103,75	10,375	10,194	10,856
Perte de sillage proportionnelle [%]	0,15	-	0,06	0,21
Vitesse moyenne [m/s]	-	9,44	9,25	9,73
Densité de puissance [W/m2]	-	831	764	895

II.7.4- Implantation a une seule rangée :

À titre de comparaison, nous avons simulé un parc éolien avec une configuration à une seule rangée face aux directions des vents dominants, comme le montre la figure (II.9). Bien que cette configuration couvre une grande distance, l'écart des résultats obtenus à partir de deux rangées est insignifiant, comme le montre le tableau (II.8).

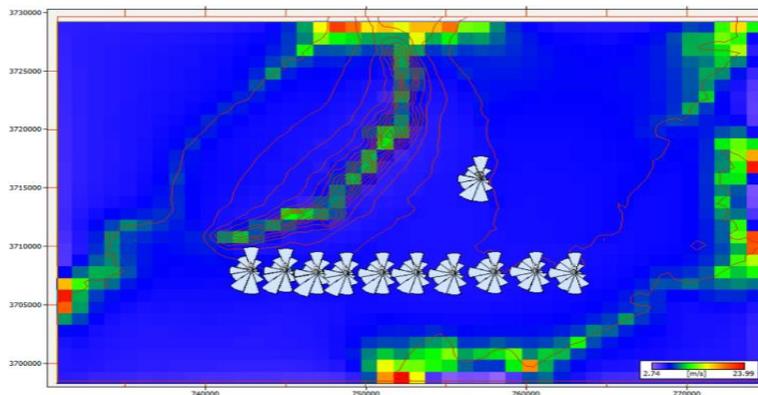


Figure (II.9) : Disposition des éoliennes (Puissance éolienne 2 MW) au cours de la production annuelle d'énergie.

-Tableau (II.8) : Résultats de simulation de la production annuelle totale du parc éolien sans corridor

Variable	Total	Mean	Min	Max
Total Gross AEP[GWh]	103,2	10,32	10,181	10,862
Total net AEP[GWh]	102,94	10,294	10,157	10,858
Perte de sillage proportionnelle [%]	0,26	-	0,04	0,4
Vitesse moyenne [m/s]	-	9,37	9,22	9,73
Densité de puissance [W/m2]	-	809	758	887

II.7.5- résumé d'analyse de la conception du parc éolien

Nous avons constaté que l'étude de dimensionnement du site a donnée plusieurs indicateurs importants et encourageants pour la réalisation d'une ferme éolienne à Mécheria. Le potentiel éolien à 80 m d'altitude présente une vitesse moyenne de 9,44 m/s et une densité de puissance de 350 W/m² pour la direction privilégiée. Le choix optimal de l'installation de 10 machines sur le site qui génère une énergie annuelle totale de 103,91 GWh et une énergie nette de 103.75 GWh en entraînant une perte de 0,16 GWh, reflétant une valeur de 0,15 % de l'effet de flux de sillage. Les indices de réussite présentés dans cette analyse montrent que la conception et l'hybridation de ce site la centrale photovoltaïque NAAMA de 20 MW en opération depuis 2017, est très réalisable.

II.8- Evaluation de la conception de la centrale photovoltaïque de NAAMA

II.8.1- Introduction

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque est une étape de mesure où il nécessite de prendre en considération des critères techniques, météorologiques, économiques, contractuels et stratégiques d'un projet. Le choix de ses paramètres dépend de la taille du champ photovoltaïque, lui-même détermine par la puissance de consommation. Dans ce chapitre notre travail consiste à élaborer un dimensionnement des installations de la centrale, en prennent en considération tous les paramètres, en gardant aussi le même choix de l'entreprise en ce qui concerne les type des équipements. [34]

II.8.2- Modélisation du système photovoltaïque :

Le système photovoltaïque comprend deux composantes, le champ photovoltaïque et l'onduleur.

II.8.3- Modèles de comportement du champ photovoltaïque :

L'étude du fonctionnement des systèmes photovoltaïques en régime permanent nécessite des modèles permettant de calculer l'énergie générée par le système photovoltaïque.

Il existe deux types de modèles :

- ✓ soit ils modélisent le rendement du générateur solaire.
- ✓ Soit ils modélisent le courant et la tension du module et donc la puissance électrique.

Quel que soit le modèle choisi, l'influence du rayonnement solaire et de la température ambiante doit être prise en compte.

II.8.3.1- Le modèle du rendement : [35]

Le modèle le plus connu qui reflète le comportement du rendement d'un module photovoltaïque est :

$$\eta_{pv} = \eta_{ref} \left[1 - \beta' (T_{cell} - T_{cell,ref}) + \gamma_{log} \left(\frac{G_{\beta}}{G_{\beta,ref}} \right) \right] \quad (2.1)$$

Ou

T_{cell} : est la température de cellule.

η_{ref} : est le rendement du module dans les conditions standards (éclairage solaire sur le plan du

$G_Q = 1000 \text{ W/m}^2$ et température des cellules $T_{cell} = 25^\circ\text{C}$)

γ et β' : sont respectivement les coefficients de l'éclairage solaire et de la température

Les paramètres des conditions standards ($T_{(cell, ref)}$ et η_{ref}) et les coefficients γ et β' sont fournis par les fabricants de modules photovoltaïques.

Certains auteurs (Evans, 1981) utilisent $\beta' = 0,0048 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ et $\gamma = 0,12$ pour les modules en silicium monocristallin.

Plus courant dans l'équation (2.1) on prend $\gamma = 0$ (Evans et Flor Schütz, 1977).

D'autres auteurs (Hegazy, 2000, Bergene et Lovik, 1995) utilisent les valeurs respectives de 0 et 0,004 pour γ et β' .

La température des cellules est le plus souvent calculée à l'aide du terme NOCT (Normal Operating Cell Temperature) (Nolay, 1), fourni par les fabricants de modules photovoltaïques et défini par l'équation :

$$T_{cell} = T_{\alpha} + (NOCT - 20C^0) \left[\frac{G_{\beta}}{800} \right] \quad (2.2)$$

Sauf pour les modules intégrés aux toitures des bâtiments, cette méthode donne des résultats satisfaisants.

Le NOCT est défini dans les conditions suivantes: vitesse du vent $V=1$ m/s, température ambiante $T_a=20^0C$ et rayonnement solaire $G_{\beta}= 800W/m^2$ (ASTM, 1998, Myers et al, 2002).

Le modèle de Paatero et Lund (2007) peut également être utilisé, voir l'équation :

$$\eta_{pv} = \eta_{ref} \left[1 - \alpha \left(\frac{G_{\beta}}{18} + T_{\alpha} - 20 \right) \right] \quad (2.3)$$

$\alpha=0.0042$ est le coefficient de température pour la correction de puissance. L'objectif du calcul de l'efficacité du module est de trouver la puissance maximale P_{mp} à la sortie du module à l'aide de l'équation (2.3).

Les coefficients où les conditions normales de rayonnement solaire $G_{\beta, ref}$ et la température des cellules $T_{cell, ref}$ ont les mêmes valeurs que dans les autres modèles ($1000 W/m^2$ et $25^{\circ}C$), AM est la masse d'air relative définie par (2.4) (Kasten et Young, 1989) et sa valeur dans des conditions normales est $AM_0=1,5$.

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z + 0.50572(96.07995 - \theta_z)^{-1.6364}} \quad (2.4)$$

Où:

L'angle zénithal θ_z est en degré.

La température de cellules est calculée par la formule de Ross (Driesch et al, 2007 ; Ross 1976).

$$T_{a+h_R G_{\beta}} \quad (2.5)$$

Le calcul du rendement du module a pour objectif de déterminer la puissance maximale P_{mp} à la sortie du module en utilisant (2.6):

$$P_{mp} = \eta_{pv}(G_{\beta}, T_{cell}) G_{\beta} A \quad (2.6)$$

A est la surface du module photovoltaïque en m^2 .

Le premier est une expression directe pour la puissance en utilisant une formule empirique (Labbe, 2006

$$P_{max} = \frac{G_{\beta}}{G_{\beta,ref}} [P_{mp,ref} + y_0 (T_{cell} - T_{cell,ref})] \quad (2.7)$$

y_0 est le coefficient de température pour la puissance du module et est $P_{mp,ref}$ sa puissance nominale.

II.8.3.2- Modèle qui regroupe la puissance au rendement : [36]

$$P_{pv}(t) = P_{rate_pv} \times \frac{G}{G_{ref}} \times [1 + K_t (T_{cell} - T_{ref})] \times \eta_{pv} \quad (2.8)$$

$P_{pv}(t)$: est la puissance générée par un module PV.

P_{rate_pv} : est la puissance nominale dans des conditions de test standard.

G : est le rayonnement solaire horaire.

G_{ref} : est l'éclairement dans les conditions de référence ($1000W/m^2$ et $25^{\circ}C$).

K_t : est le coefficient de température de la puissance nominal et sa valeur égale -3.7×10^{-3} . Pour les cellules mono et poly cristallines.

$\eta_{\square\square}$: est le facteur de perte global.

Le rendement $\eta_{\square\square}$ varie de entre $[0.8 \ 0.87]$ pour cette raison la majorité des utilisateurs prennent le rendement 0.8.

\square_{\square} : est la température ambiante dans les conditions de référence ($25^{\circ}C$)

II.9- Méthodologie de dimensionnement

Afin d'avoir une souplesse au niveau de la maintenance du champ photovoltaïques, pour éviter les coupures totale de la production et la perte de l'alimentation des abonnés, la méthode de dimensionnement des centrales à grande échelle est basée sur un principe morcellement très simple. L'ensemble des champs est répartie à des petit éléments de deux mégawatts appelé SKID. Chaque élément est connecté avec deux onduleurs chacun a une puissance de un mégawatt à travers un transformateur tertiaire. Chaque SKID est une armoire portant trois jeux de barres appelée RMU, un jeu de barre pour la connexion du SKID et les deux autres pour raccorder les RMU l'une à l'autre. L'ensemble des RMU seront connectées avec l'armoire du transformateur de réseau. Généralement les RMU ne doivent pas dépasser 5 ou 6 pour réduire la taille du transformateur du réseau [37]. Cependant à l'aide de cette méthodologie la centrale de grande puissance sera décomposé a des petites centrale de un mégawatt. Ainsi tout le calcul du nombre de panneaux, des sections des câbles, des leurs cheminement et leur poses et de la protection sera simplifier a un calcul d'une centrale de petite puissance de un mégawatt comme il est expliqué par la suite cette simplification est illustrée par les figures (II.10), (II.11) et (II.12).

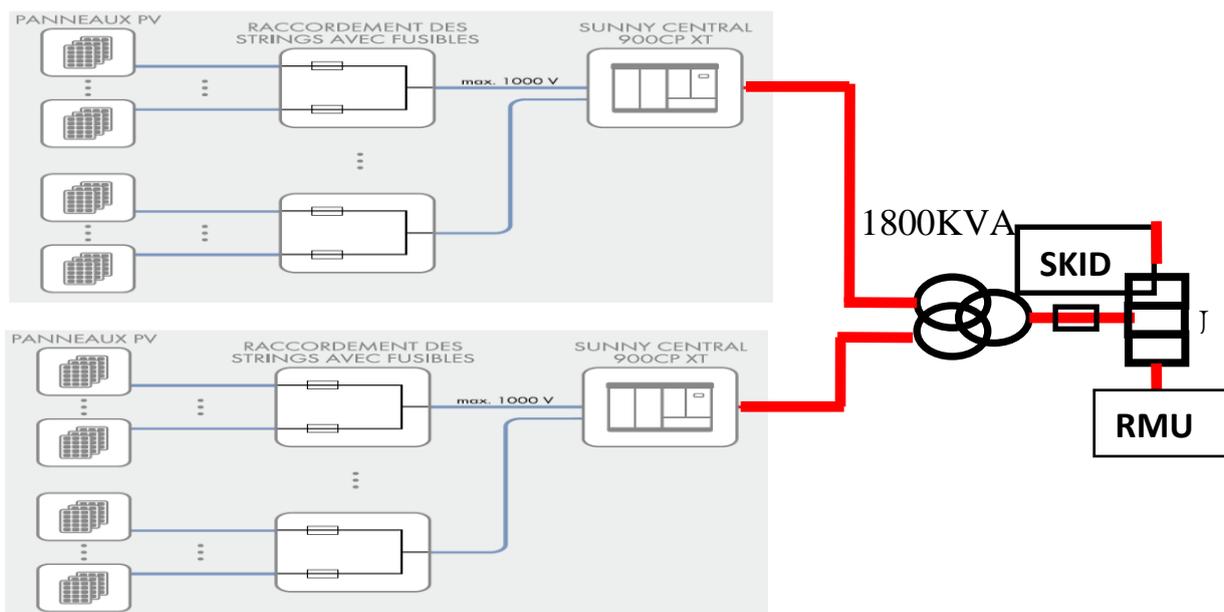


Figure (II. 10) : branchement de SKID avec onduleurs.

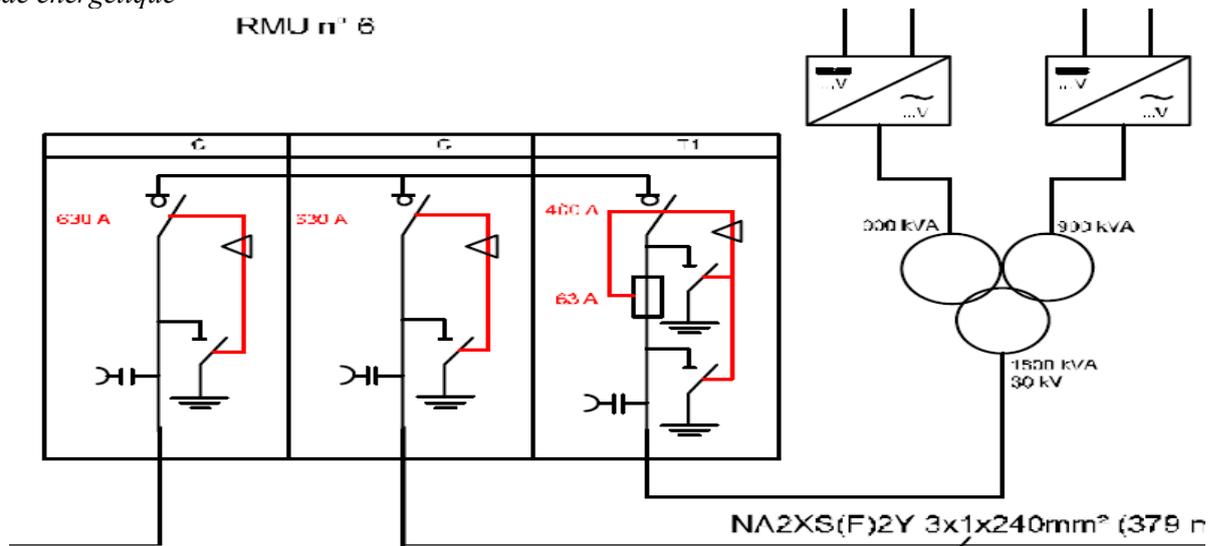


Figure (II.11) : branchement des RMU avec SKID.

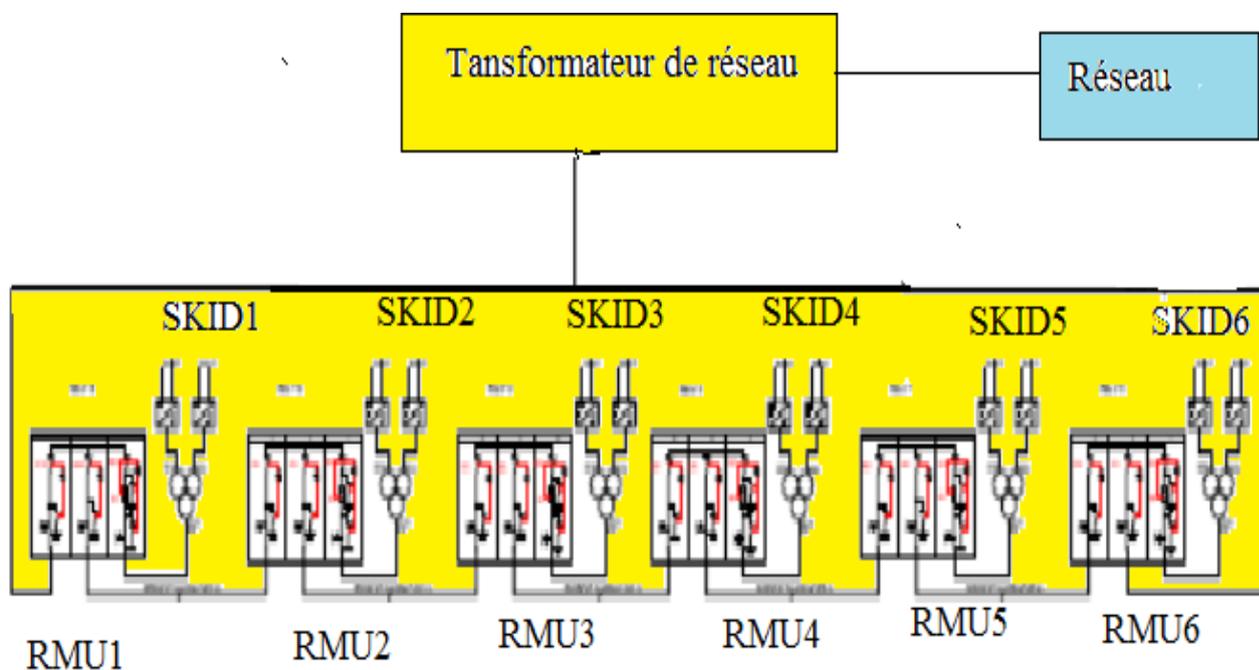


Figure (II.12) : branchement des RMU avec transformateur de réseau.

II.9.1- Les étapes de dimensionnement d'un système photovoltaïque [38]

La méthodologie de dimensionnement d'un système photovoltaïque dépend des étapes suivantes :

II.9.1.1-Le choix des modules photovoltaïque :

Le module choisi est un module de type silicium poly cristallin Haniwa Solar HSL60P6-PB-1-250 d'une puissance optimale de 250Wc, pour des raisons économique, il est choisi essentiellement pour son prix, le tableau (annexe01) montre plus de détails de ces caractéristiques.

$$- I_{opt} = 8,23 / I_{cc} = 8.79A \quad U_{opt} = 30.4 / U_{co} = 37.7V$$

II.9.1.2- Production électrique d'un module en une journée :

Un module photovoltaïque se caractérise avant tout par sa puissance crête P_c (W), puissance dans les conditions STC (1000 W/m² à 25 °C). Si le module est exposé dans ces conditions STC, il va produire à un instant donné une puissance électrique égale à cette puissance crête, et si cela dure N

Chapitre II : évaluation du dimensionnement et du fonctionnement des éléments du système hybride pour l'étude énergétique

heures, il aura produit pendant ce temps une énergie électrique E_{Peod} égale au produit de la puissance crête par le temps écoulé :

$$E_{Peod} = N \times P_c \quad (2.9)$$

- E_{Peod} : Énergie électrique produite (Wh)
- N : Nombre d'heure d'exposition à la condition STC
- P_c : Puissance crête (W)

Grâce à la valeur du rayonnement de référence (1000W/m^2), le nombre d'heures équivalentes se trouve numériquement égale à l'énergie solaire intégrée que l'on exprime en $\text{kWh/m}^2/\text{j}$.

$$E_{sol} = N_e \times 100 \quad (2.10)$$

- E_{sol} : Énergie solaire journalière par unité de surface ($\text{Wh/m}^2/\text{j}$)
- N_e : Nombre d'heure équivalentes (h/j)
- 1000 W/m^2 : puissance dans les conditions STC

II.9.1.3- Évaluation du coefficient des pertes C_p :

Généralement le taux des pertes est mentionné avec les caractéristiques techniques de chaque appareil

Pour les installations photovoltaïques ces pertes sont chiffrées comme suit :

- Pertes onduleurs 10% ;
- Pertes température 10% ;
- Pertes câbles et connexion 3% ;
- Pertes Pour les « salissures » 10% ;
- Pertes faible éclaircissement 4% ;
- Pertes due à la qualité de module 3%.

Alors le coefficient de perte en courant est :

$$C_p = 0.9 \times 0.9 \times 0.97 \times 0.90 \times 0.96 \times 0.97 = 0.65 = 65\% \text{ soit } 100\% - 65\% = 35\% \text{ de pertes totales}$$

II.9.2- L'inclinaison des modules photovoltaïques

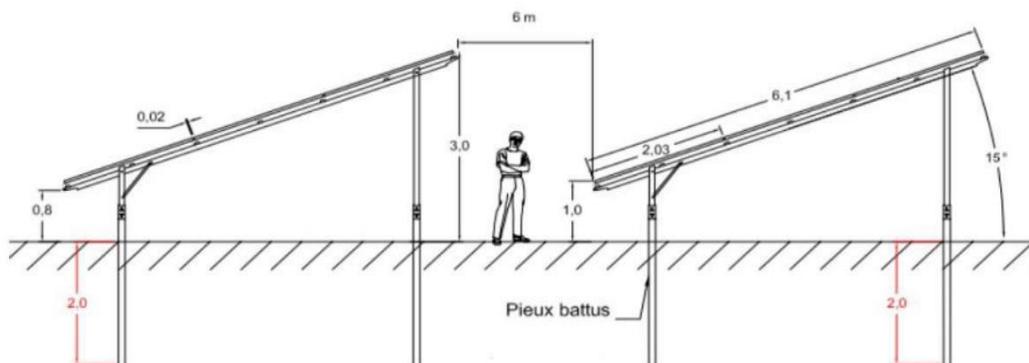


Figure (II.13) : Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques

Dans le cas de notre projet l'installation choisie et de type fixe incliné de 15° plein sud ce choix est basé sur les considérations suivantes : [39]

- L'inclinaison de 15° aura une production quasiment optimale pendant la période d'été car c'est en été que l'ensoleillement est maximal.
- Les installations fixes nécessitent une faible maintenance en raison de l'absence de moteurs et

de dispositifs pivotants.

- Les éléments de fixation des modules et leur propre structure sont montés de façon à ne pas créer des zones d'ombrage sur les modules. La distance entre chaînes est égale à 6 m.

II.9.3- Composition du sous champ photovoltaïque d'un onduleur :

La taille d'un champ photovoltaïque dépend principalement de sa puissance crête le branchement des modules en série est limité par la tension d'entrée de l'onduleur par contre leurs connexion en parallèle dépend du courant de l'onduleur.

Pour un fonctionnement durable de la centrale et pour assurer un bon isolement des parties du système En cas de défaillance d'une part. D'autre part suite aux proportionnalités entre le prix et la qualité et la puissance des onduleurs dans le marché international. Le système a été divisée en plusieurs sous centrale de puissance 1MW chaque sous centrale contient un ensemble de panneaux branchés a un onduleur de 1MW. La centrale de NAÄMA de 20 MW a été répartie en 20 onduleurs.

II.9.4-Nombre totale des panneaux par onduleur :

Nous rappelons que le module choisi a une puissance de 250W sous 30,4V donc le nombre total de modules N_t est exprimé comme suit :

$$N_t = \frac{P_{cx}}{\text{puissance crête unitaire du module}} \quad (2.11)$$

$$P_{cx} = \frac{P_u}{N_e \cdot C_p} \quad (2.12)$$

- N_t : le nombre total des modules
- P_{CX} : puissance Crête
- P_u : Puissance Utile
- N_e : nombre d'heures d'ensoleillement
- C_p : Coefficient des pertes

Ce qui implique que le nombre des modules est :

Donc limité par la tension de l'onduleur choisi je détermine le nombre des modules branché en série, et en fonction des courants maximale de l'onduleur en calcul le nombre des strings en parallèle.

L'onduleur délivre presque la même puissance que celle du générateur photovoltaïque avec un écart.

II.9.5- Puissance nominale :

Dû soit à la technologie des panneaux, soit à l'effet de la température ou au rendement de l'onduleur.

Il est en effet important de respecter la relation admettant le fait que la puissance d'onduleur soit comprise entre 0,7 fois et 1,2 fois la puissance crête du champ. De ce fait, une étude de la Deutsch Gesell a montré que le ratio entre la puissance de l'onduleur P_o (898 voir annexe 02) et la puissance du champ photovoltaïque P_c doit être compris entre.

$$\frac{P_o}{P_c} = \frac{898}{938} = 0.95 \quad 0.7 \leq 0.95 \leq 1.2 \quad (2.13)$$

Avec :

- P_o : Puissance maximale de l'onduleur ;
- P_c : Puissance crête de sous centrale.

Après le choix de l'onduleur suivant les conditions de dimensionnement cité ci-dessus et après un calcul, nous avons obtenus le tableau suivant :

-Tableau (II.9) : Tableau récapitulatif de dimensionnement de la centrale PV

SKI D	Onduleurs	Nbr total de modules	Nbr en série	Nbr shunt	Imax(A)	Umax (V)	Puissance crete MWc
01	1	3984	24	166	1494	897,6	1,01592
	2	3984	24	166	1494	897,6	1,01592
02	3	3984	24	166	1494	897,6	1,01592
	4	3984	24	166	1494	897,6	1,01592
03	5	3984	24	166	1494	897,6	1,01592
	6	3984	24	166	1494	897,6	1,01592
04	7	3984	24	166	1494	897,6	1,01592
	8	3984	24	166	1494	897,6	1,01592
05	9	3984	24	166	1494	897,6	1,01592
	10	3984	24	166	1494	897,6	1,01592
06	11	3984	24	166	1494	897,6	1,01592
	12	3984	24	166	1494	897,6	1,01592
07	13	3984	24	166	1494	897,6	1,01592
	14	3984	24	166	1494	897,6	1,01592
08	15	3984	24	166	1494	897,6	1,01592
	16	3984	24	166	1494	897,6	1,01592
09	17	3984	24	166	1494	897,6	1,01592
	18	3984	24	166	1494	897,6	1,01592
10	19	3984	24	166	1494	897,6	1,01592
	20	3984	24	166	1494	897,6	1,01592
		79680		3320			20,3184

II.9.6- Interprétation et évaluation :

Ce tableau montre qu'il y a une grande concordance entre le fonctionnement de la centrale et la répartition des différents sous centrales. En plus cette répartition présente un grand équilibre entre les onduleurs point de vue nombre de panneaux, branche parallèles et nombre de panneaux séries. Cette répartition indique que chaque onduleur bien dimensionné pour fonctionner dans un régime nominal.

II.10- Le câblage

Les câbles sont considérés comme l'âme d'une installation électrique, en outre un sur dimensionnement engendre des surcoûts dans la réalisation du projet, par contre un sous dimensionnement peut engendrer des échauffements et causer un dysfonctionnement de l'installation électrique, d'où la nécessité d'un dimensionnement optimal pour cela la détermination des sections des câbles permettra de minimiser les pertes lors du transport de l'électricité et la chute de tension. Pour faire ce dimensionnement, nous avons besoin de tracer le schémas unifilaire de notre installation et de calculer l'intensité du courant qui circule dans ces câbles dont le courant d'emploi et le courant admissible en tenant compte de tous les condition de pose du câble ,nature de câble , la température de fonctionnement . [40]

II.10.1- Le schéma unifilaire :

Le nombre de branche de chaque onduleur sont regroupé en paire comme suit :

Chaque deux string forme un nœud appelée table, chaque huit tables (16 string) sont connecté ensemble pour former un box et toutes les box sont relier un box centrale relier avec l'onduleur.

Câble DC de chaine solaire (combineur en T)

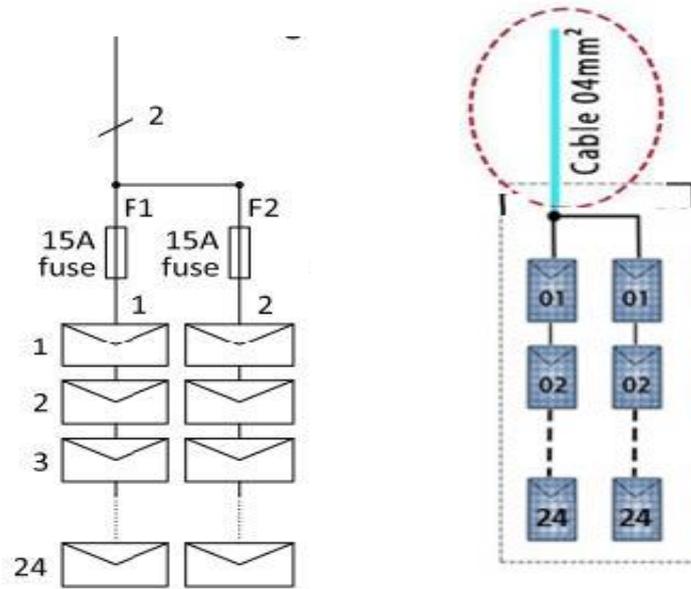


Figure (II.14) : Câble DC de chaîne solaire (combineur en T).

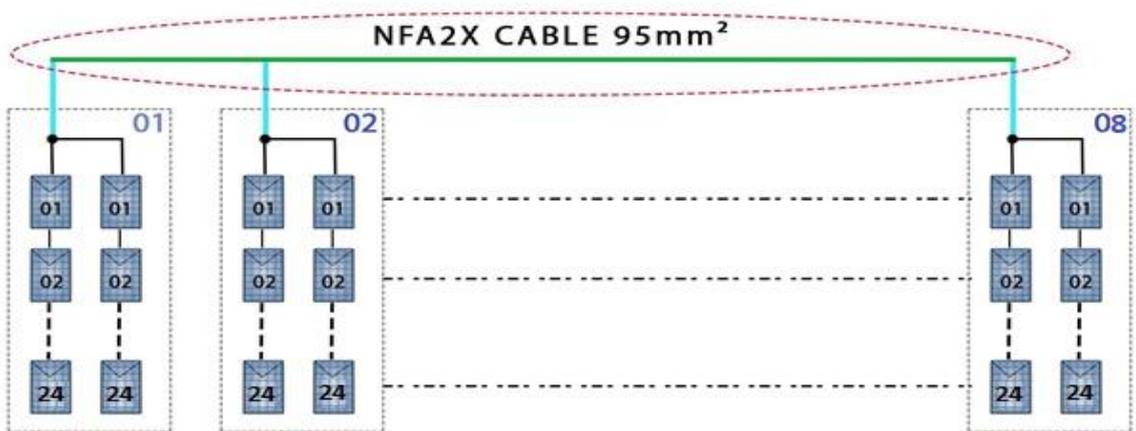


Figure (II.15) : Schéma Unifilaire d'un box

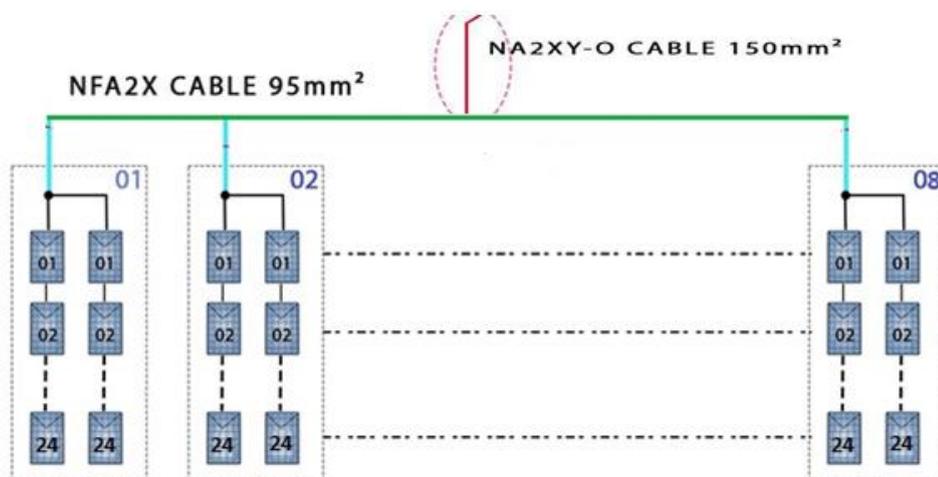


Figure (II.16) : Schéma Unifilaire d'un box avec le câble de sortie

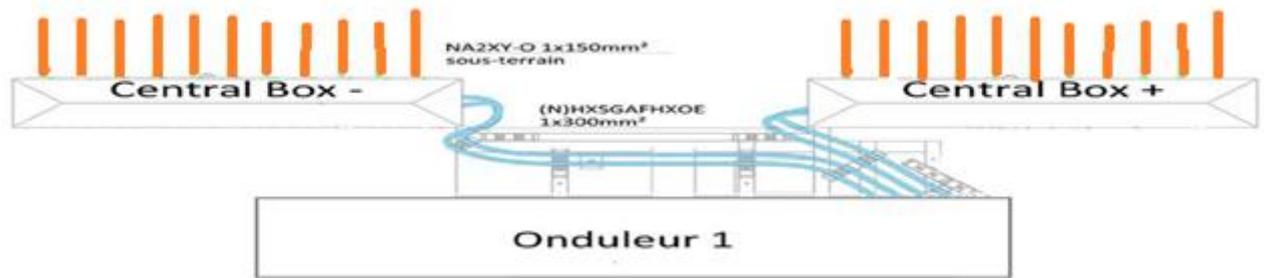


Figure (II.17) : Schéma Unifilaire d'un central box les deux câbles vers l'onduleur.

II.10.2- Le courant d'emploi :

Le courant d'emploi IB est le courant correspondant à la plus grande puissance transportée par le circuit en service normal, Il est déterminé à partir du courant absorbé et corrigé par un coefficient d'extension de 1.25 contre les surcharge côté continu provient de la norme 712433 voir annexe.

II.10.3- Le courant admissible :

Le courant admissible Iz d'un conducteur est le courant susceptible de passer dans les conditions normales sans préjudice de disfonctionnement ou dégradation du câble. En pratique Iz est calculé à partir du courant IB en tenant compte des contraintes du milieu ou sont posées les canalisations. Le courant d'emploi (IB) est lié au courant admissible par la 2relation :

$$\frac{IB}{K1 \cdot K2 \cdot K3} < Iz \quad (2.14)$$

Avec :

- Le facteur de correction K1 prend en compte le mode de pose.
- Le facteur de correction K2 prend en compte l'influence mutuelle des circuits placés côte à côte.
- Le facteur de correction K3 prend en compte la température ambiante et la nature de l'isolant.

II.11- Étude d'un système hybride à deux sources renouvelables reliées au réseau

II.11.1- Introduction

Sur la base des modèles présentés dans chapitre 01 pour chacun des générateurs d'énergie, nous allons analyser le fonctionnement des systèmes hybrides qu'ils travaillent en parallèle avec le réseau électrique. [41]

II.11.2- Structure du système :

Dans cette partie, nous allons étudier la possibilité d'utiliser un système hybride, composé de deux sous-systèmes à sources d'énergie renouvelables (éolien et PV) afin de satisfaire les besoins des consommateurs. Deux possibilités sont analysées à savoir une alimentation complète de la charge par le système hybride, c'est-à-dire qu'il se doit de fonctionner en régime autonome et une utilisation du système hybride pour l'écrêtage des pointes de consommation, situation typique pour un fonctionnement du système en parallèle avec le réseau électrique.

Les sous-systèmes à sources d'énergie renouvelables choisis sont de type photovoltaïque et éolien. Il est supposé dans cette partie du travail que l'excès d'énergie propre produit par le système est injecté au réseau pour améliorer le service réseau et réduire les émissions de gaz polluant. Dans le cas d'un manque d'énergie produite par les deux sources, le consommateur est alors alimenté par le réseau.

II.11.3- Le Système photovoltaïque :

Il représente une centrale de capacité 20MW mis en service en 2017 au sud algérien son dimensionnement est décrit précédemment dans ce chapitre. Les panneaux PV sont orientés vers le Sud avec une inclinaison de 15° par rapport au sol.

II.11.4- Le générateur éolien :

Dans cette étude, on considérera que le système hybride a une puissance nominale globale de 40MW. Donc chaque source peut produire une capacité de 20 MW. Les motifs de ce choix sont expliqués dans le chapitre I. Les inventaires de machines que nous avons réalisés et le modèle la courbe de puissance sont exposés au début de ce chapitre. Les études présentées précédemment montrent que l'on obtient une productivité maximale pour des éoliennes qui atteignent la puissance maximale à faibles vitesses de vent. Le modèle linéaire de courbe de puissance reflète d'une manière correcte la forme de la courbe de puissance pour la zone de fonctionnement comprise entre la vitesse d'enclenchement et la vitesse de puissance nominale.

Selon la puissance de l'éolienne choisie, la hauteur du moyeu joue un grand rôle pour la production d'énergie.

II.11.5- Charge à satisfaire par le système hybride :

On considère ici que le système hybride devra satisfaire une consommation dont la courbe de charge est la consommation réelle d'une région d'une wilaya. Cette courbe de consommation a été choisie parmi les modèles de charge disponible dans la littérature scientifique. La variation journalière de la charge est présentée sur la Figure (II.18).

Lorsque le système hybride travaillera en mode autonome alors toute la charge devra être satisfaite. Lorsqu'il travaillera en mode parallèle avec le réseau électrique, il sera utilisé uniquement pour l'écrêtage de la consommation : ainsi chaque jour de l'année, nous déterminerons la valeur minimale de la charge (charge de base) qui devra être alimentée par le réseau et la puissance supplémentaire appelée devra être couverte par le système hybride.

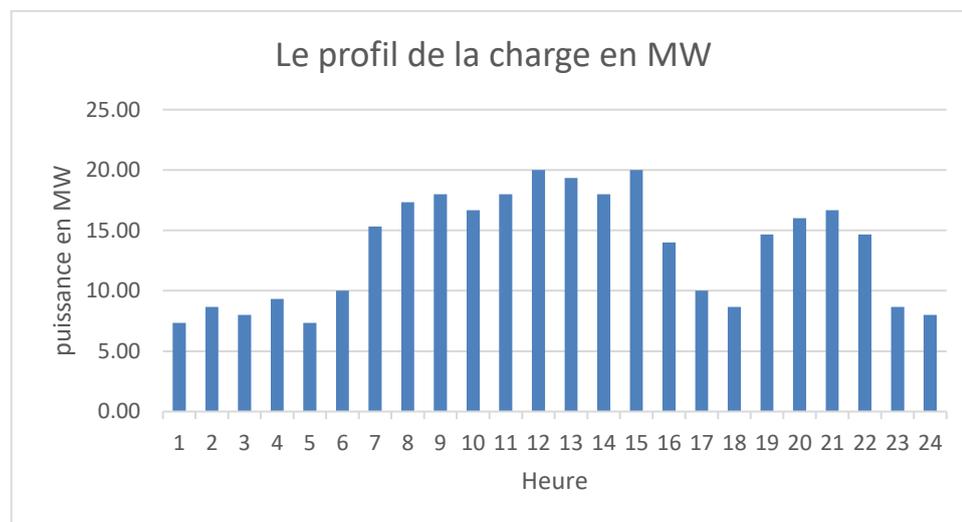


Figure (II.18) : La variation journalière de la charge

II.12- Méthode et hypothèses [42]

Le système hybride étudié est composé d'un système photovoltaïque, d'un générateur éolien raccordé au réseau. On considère que la puissance nominale totale du système est supérieure à la puissance maximale de la charge à alimenter. Ainsi si le système est composé de deux sous-systèmes à puissance nominale identique et égale à la puissance maximale consommée, alors la charge pourrait être satisfaite même en cas de manque d'une des ressources primaires. Dans notre cas concret, la charge a une puissance maximale de 20 MW, donc la puissance maximale du système hybride est de 40MW. La puissance nominale du système hybride est la somme des puissances de ces deux sous-systèmes. A partir des données météorologiques à notre disposition et des modèles pour décrire le comportement du générateur éolien et photovoltaïque que nous avons décrits précédemment nous

Chapitre II : évaluation du dimensionnement et du fonctionnement des éléments du système hybride pour l'étude énergétique

calculons pour chaque heure i l'énergie produite ($E_{PV}(i) + E_{WT}(i)$). Celle-ci est comparée avec la charge électrique (E_{charge}). Si la différence entre l'énergie produite et l'énergie appelée D est positive, alors l'excès d'énergie sera injecté au réseau, si cette différence est négative, il y a donc une pénurie d'énergie et le réseau doit fournir l'énergie nécessaire manquante. Si le réseau est en panne pour assurer cette différence, une avarie est enregistrée et les paramètres suivants sont calculés – énergie non satisfaite et durée de la panne.

- Une fois les calculs réalisés pour chaque heure de l'année, les paramètres suivants sont calculés :
 - La différence absolue annuelle entre l'énergie produite et la charge D_{an} :

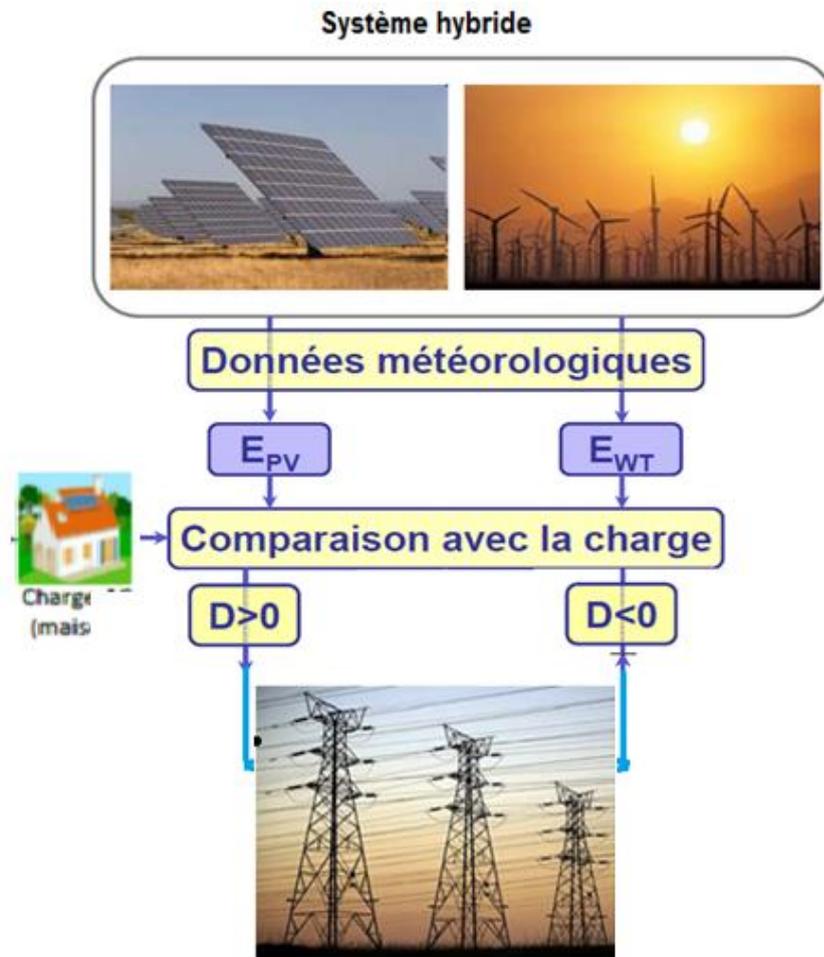


Figure (II.19) : illustration de l'algorithme de calcul

$$D(an) = \sum_{i=1}^{8760} ((E_{Pr}(i) + E_{WT}(i) - E_{charge}(i))) \quad (2.15)$$

- L'énergie du réseau et sa valeur maximale (2.16) :
- $E(rés) = \sum_{i=1}^{8760} (E_{PV}(i) + E_{WT}(i) - E_{charge}(i))$ Si $E_{PV}(i) + E_{WT}(i) - E_{charge} > 0$
- $E(rés)_{max} = \max (E_{PV}(i) + E_{WT}(i) - E_{charge}(i))$ Si $E_{PV}(i) + E_{WT}(i) - E_{charge} > 0$ (2.16)
- L'énergie totale non satisfaite E_{fault} et la durée des avaries au cours de l'année T_{fault} (2.17) :

- $E_{fault} = \sum_{i=1}^{8760} (E_{fromréseau} + E_{PV} + E_{\Pi T}(i) - E_{charge}(i))$ Si $E_{fromréseau}(i) + E_{PV}(i) + E_{\Pi T}(i) - E_{charge} < 0$
- $T_{fault} = \sum_{i=1}^{8760} \frac{(E_{fromréseau} + E_{PV} + E_{\Pi T}(i) - E_{charge}(i))}{E_{charge}(i)}$
- Si $E_{fromréseau}(i) + E_{PV}(i) + E_{\Pi T}(i) - E_{charge} < 0$ (2.17)

Pour chaque combinaison possible de sous-systèmes éolien et PV, on calcule les paramètres définis par (2.15), (2.16) et (2.17), puis on détermine la configuration optimale de puissances crêtes des deux générateurs selon un des critères suivants :

- Une valeur minimale de D_{an} – c'est-à-dire la valeur absolue de la différence minimale entre l'énergie produite et consommée. Il s'agit ici de la valeur absolue de cette différence, si la différence est négative, cela implique que la charge n'est pas satisfaite par le système.
- Un nombre minimal d'avaries – dans ce cas, le consommateur se verra privé d'électricité le moins de fois possible.
- Une durée minimale des avaries sur l'année – dans ce cas, le consommateur se verra privé d'électricité le moins longtemps possible ; C'est une amélioration par rapport au critère précédent car la durée des avaries peut être différente.
- Une énergie minimale non satisfaite.

Pour certains critères il sera possible d'avoir plusieurs solutions optimales. Dans ce cas de figure, un second critère sera appliqué pour arriver à une solution unique.

La méthode et la recherche de la configuration optimale du système hybride ainsi décrites sont appliquées à deux régimes de fonctionnement du système hybride.

II.13- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons constaté le dimensionnement des différentes composantes du système multi sources proposé au niveau de Naama, le champ photovoltaïque et la ferme éolienne. Concernant le générateur PV nous avons inspiré le travail à partir de la littérature et les documents de la centrale, concernant la conception de la ferme éolienne a été inspirée du travail de l'équipe de laboratoire recherche. Les indices de réussite obtenus dans cette analyse justifient la conception de ce système hybride, reliant la centrale photovoltaïque NAAMA de 20 MW en opération depuis 2017, avec ce nouveau parc éolien de recherche à Mécheria, pour améliorer la qualité de distribution de l'énergie dans le respect de l'environnement et augmenter la pénétration des énergies renouvelables sur le territoire national. Cependant, le dernier chapitre sera consacré à la simulation du fonctionnement du système hybride proposé, la détermination de la configuration optimale faisable et l'étude technico économique de ce dernier par le logiciel Homer.

***Chapitre III :
Simulation de fonctionnement du système hybride***

III.1-Introduction :

Les énergies solaire et éolienne sont des sources d'énergie renouvelables intermittentes à l'exception de l'énergie géothermique qui est constante et stable mais coûteuse. Les énergies photovoltaïque et éolienne ne peuvent à elles seules fournir une charge de base 24 heures sur 24, car le soleil ne brille pas 24 heures sur 24 et le vent ne souffle pas toujours. Pour surmonter la faiblesse d'un système énergétique autonome tel que l'énergie solaire ou éolienne, une combinaison d'une ou plusieurs ressources énergétiques est nécessaire pour créer un système d'énergie renouvelable hybride (HRES). La combinaison de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne, avec l'alimentation du réseau, peut former un HRES plus rentable pour produire une énergie fiable disponible 24 heures sur 24. Pour trouver le système énergétique hybride optimal on utilise des données réelles d'irradiation éolienne et solaire. Pour cette étude on a proposé trois combinaisons de système d'énergie renouvelable .

- Le système éolien connecté au réseau
- Le système d'énergie photovoltaïque connecté au réseau
- Le système d'énergie renouvelable hybride connecté au réseau (photovoltaïque-éolien)

Afin de trouver une bonne combinaison de ressources énergétiques optimale et la plus économiquement adaptée

III.2 Simulation dans le HOMER

Pour atteindre cet objectif, un outil logiciel puissant appelé HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) a été utilisé pour trouver le système énergétique hybride optimal en utilisant des données réelles d'irradiation éolienne et solaire dans la région des villes Mecheria et Naama, pour déterminer le type de système hybride effectivement installé. Après avoir introduit les différents composants du (HRES), nous simulons les différentes configurations de notre système d'étude.

Cela comprend la saisie des données suivantes dans le logiciel HOMER :

- coûts associés à l'utilisation du composant du système.
- frais de remplacement de tout bien, compte tenu de sa durée de vie, en fonction de son usage et le Coûts des coût d'exploitation et de maintenance

Nous obtenons de nombreux résultats sous la forme d'une liste de configurations possibles :

- Configurations divisées par prix du kilowatt-heure (COE).
- Configuration triée par type de système.

III.3 Description du système :

Au début il faut schématiser le système par le choix de composants qui fournissent l'énergie à la charge (PV, éolien..... ex), plus les unités de stockage (Batterie , réservoir dihydrogène) . Tous les composants sont connectés avec la charge à l'aide d'un convertisseur AC/DC, et avant de simuler le comportement du système il faut choisir les paramètres d'entrée et les paramètres de sortie du système Comme illustré dans la Figure (III .1).



Figure (III .1) : Schéma de l'architecture de simulation de Homer.

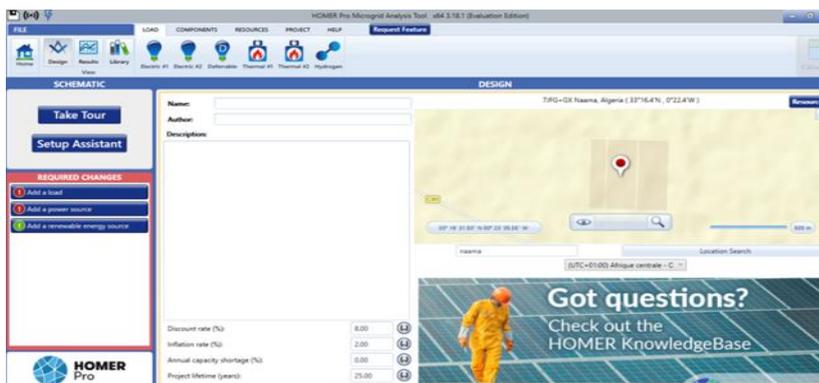


Figure (III.2): Interface HOMER .

III.4- Site d'implantation :

La figure (3.3) présente la carte géographique du site. La région de Naama

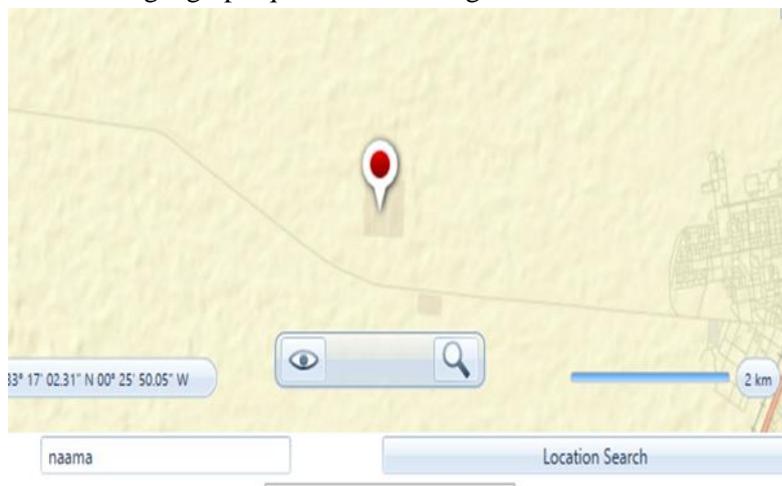


Figure (III.3): la carte géographique du site. Naama (Centrale PV)

III.5 Données météorologiques

III.5.1 Ressource solaire

La zone étudié (Mecheria – Naama) est situé les cordonnées géographiques

Naama : (latitude 33.2622 et longitude - 0.3144).

Mecheria:(latitude 33.5445 et longitude -0.2811).

Tableau (III .1) : l'irradiation journalière moyenne pour chaque mois de l'année: NAAMA

MOIS	L'indice de Claret	Irradiations (kWh /m2/j)
JANVIER	0.519	2.790
FEVRIER	0.579	3.880
MARS	0.588	4.980
AVRIL	0.630	6.360
MAI	0.647	7.200
JUIN	0.664	7.640
JEULLIET	0.686	7.720
AOUT	0.649	6.730
SEPTEMBRE	0.620	5.520
OCTOBRE	0.557	3.960
NOUVEMBRE	0.515	2.890
DECEMBRE	0.495	2.460

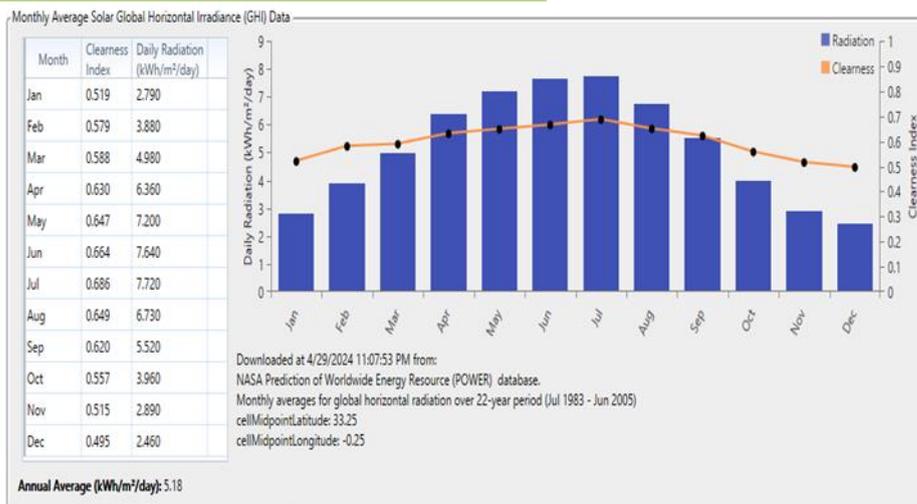


Figure (III.4): Les moyennes mensuelles du rayonnement solaire global sur le plan horizontal

On remarque sur la figure (III.4) une moyenne annuelle de radiation quotidienne, de 5,18 kWh/m²/jour.

Ainsi Les mois de mai et juin ont la plus haute radiation quotidienne (7,200 kWh/m²/jour et 7,310 kWh/m²/jour respectivement), donc on la production maximale d'énergie solaire.

III.5.2 Ressource éolienne :

Pour le système éolien, notre choix a porté sur un type d'aérogénérateurs (E-82 E2) dont la courbe de puissance est illustrée dans la figure (III.5).

Chapitre III : Simulation de fonctionnement du système hybride

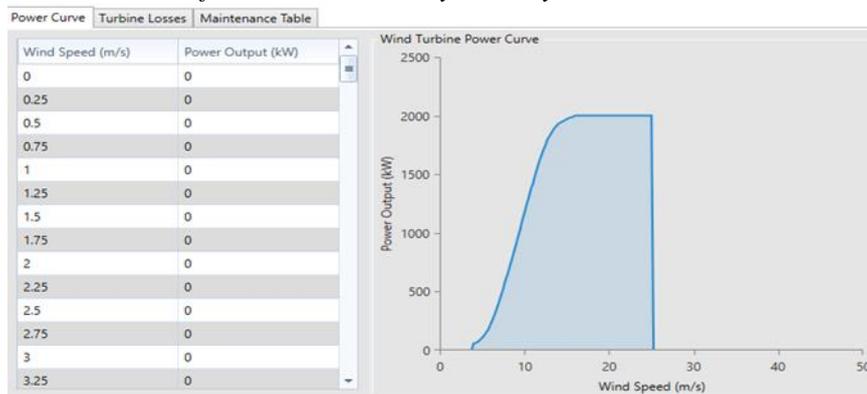


Figure (III .5) : la courbe de la puissance produite par la turbine en fonction de vitesse du vent

Ce qui concerne les informations de la vitesse du vent dans le site Naama la variation de la vitesse de vent montre que la région est ventée pendant toute l'année. La vitesse moyenne mensuelle du vent varie de 6.3 [m/s] au mois de janvier jusqu'à 6.38 [m/s] au mois de juin avec une moyenne annuelle de 6 [m/s] comme cela est illustré sur la figure

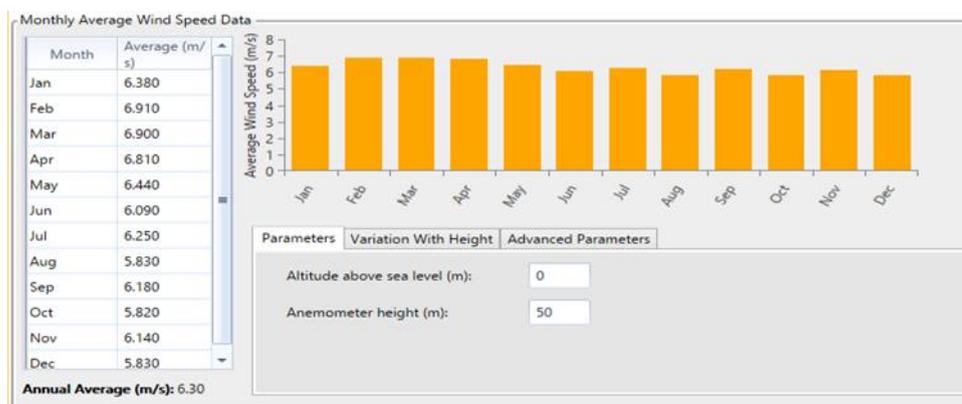


Figure (III .6) : la vitesse mensuelle du vent (m/s)

III.5.3 Ressource de température :

L'effet de la température est non négligé sur le rendement d'un système de conversion photovoltaïque, la variation de la température mensuelle moyenne est égale à 16.94°C est représenté sur la figure (III.7).

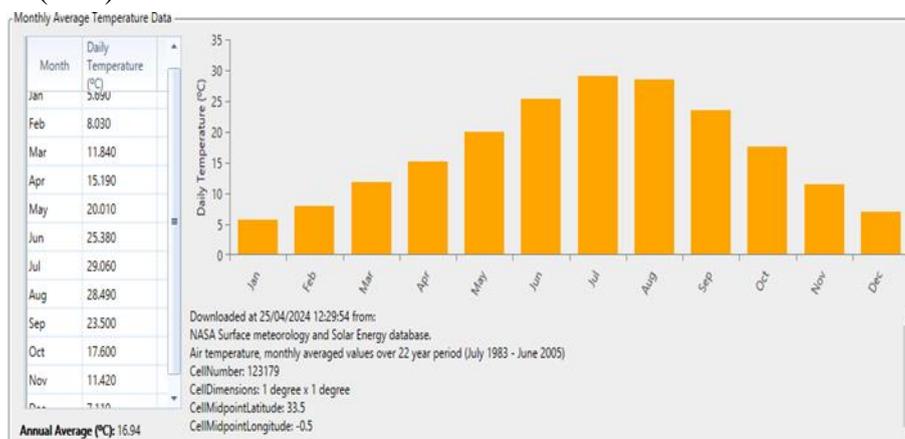


Figure (III .7): Profil de température mensuelle extrait de HOMER

III.5.4- Profil de charge :

Chapitre III : Simulation de fonctionnement du système hybride

Le dimensionnement d'un tel système de production de l'énergie dépend essentiellement du profil de la consommation à satisfaire. La figure ci-dessous représente un profil de l'évolution journalière de la charge, ce profil est considéré le même durant tous les jours de l'année.

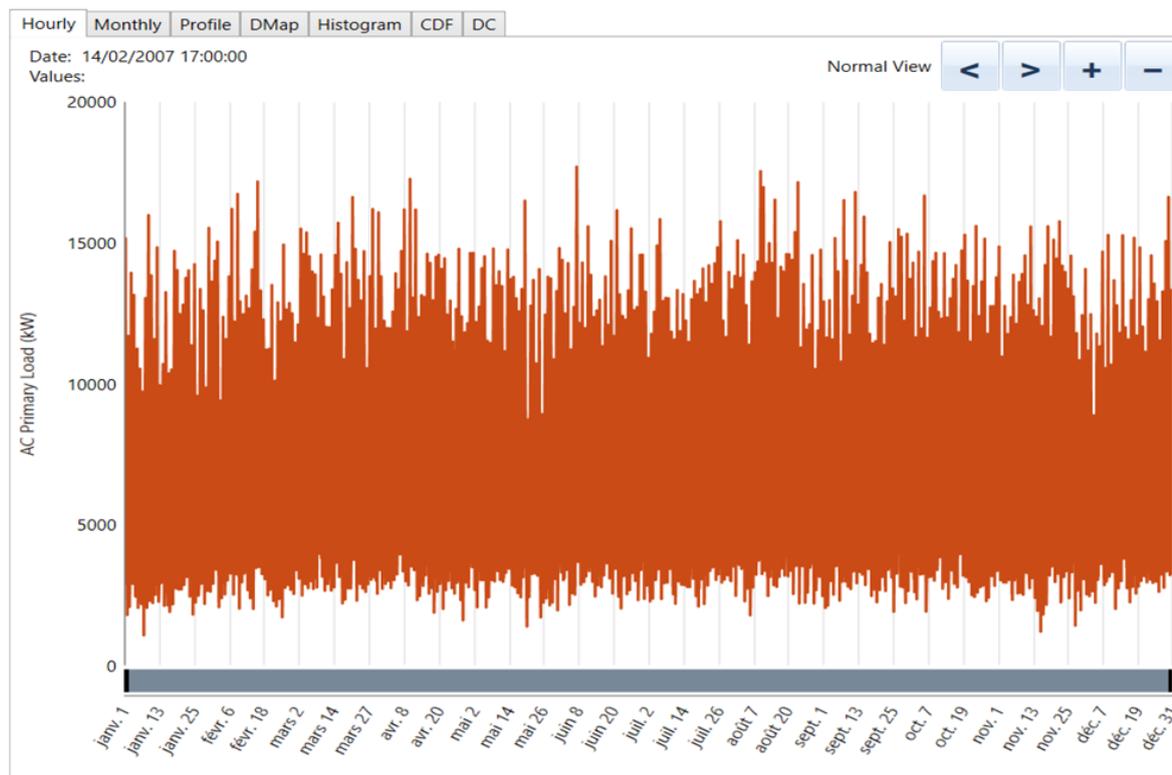


Figure (III.8) : Profil de charge annuelle.

III.6- La configuration du éolien connecté au réseau

D'après la bibliothèque d'Homer on peut insérer les différents éléments de notre système tels que les charges, les turbines éoliennes et le réseau.

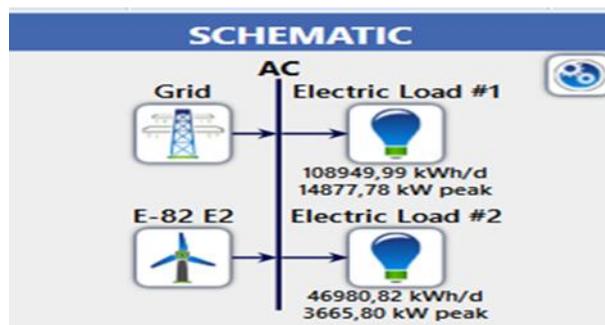


Figure (III .9): Configuration du système Eolien connecté au réseau

La première charge considérée représente une charge de consommation quotidienne de 10,949.99 kWh avec un pic de 14,877.78 kW modélisant la charge de la population de la ville de NAAMA.

La deuxième charge modélise une charge industrielle de consommation quotidienne de 46,980.82 kWh avec un pic de 3,665.80 kW.

III.7- Résultats de simulation

Une fois la simulation terminée, Homer Pro peut proposer plusieurs configurations possibles du système, on choisit la première configuration qui est la plus favorable. Dans ce cas Homer a proposé une seule configuration illustrée par la figure (III.10).

Architecture		Cost						
E-82 E2	Grid (kW)	Dispatch	COE (€)	NPC (€)	Operating cost (€/yr)	Initial capital (€)	Ren Frac (%)	Elec Prod (kWh/yr)
10	999 999	LF	0,0123 €	13,0 €M	-540 654 €	20,0 €M	70,9	82 120 72

Architecture		Cost					Sys	
E-82 E2	Grid (kW)	Dispatch	COE (€)	NPC (€)	Operating cost (€/yr)	Initial capital (€)	Ren Frac (%)	Elec Pro (kWh/yr)
10	999 999	LF	0,0123 €	13,0 €M	-540 654 €	20,0 €M	70,9	82 120 7
10	999 999	LF	0,0123 €	13,0 €M	-540 654 €	20,0 €M	70,9	82 120 7
10	999 999	LF	0,0123 €	13,0 €M	-540 654 €	20,0 €M	70,9	82 120 7
10	999 999	LF	0,0123 €	13,0 €M	-540 654 €	20,0 €M	70,9	82 120 7
10	999 999	LF	0,0123 €	13,0 €M	-540 654 €	20,0 €M	70,9	82 120 7
10	999 999	LF	0,0123 €	13,0 €M	-540 654 €	20,0 €M	70,9	82 120 7

Figure (III.10): la configuration optimale donnée par Homer

Le coût annuelle totale de cette configuration est 20 million d’euro, un coût d’énergie produite 0.0123 euro le kWh et un coût entretien et de maintenance de -540654 euro.

III.7.1- L’énergie produite par les turbines éoliennes :

Le graphe de la figure (III.11) représente le fonctionnement de l’éolienne, avec une capacité totale de 20000 kW et une production quotidienne totale de 58, 244,262 kWh. Sur l’année, elle fonctionne pendant 8608 heures, avec un maximum de 20500 kW. Le graphique présenté dans cette figure révèle que les niveaux de production sont significatifs (indiqués en jaune ou en rouge) pendant de nombreuses heures de la journée. Cette observation suggère que cette source d’énergie éolienne peut efficacement compléter l’énergie solaire dans la région étudiée.

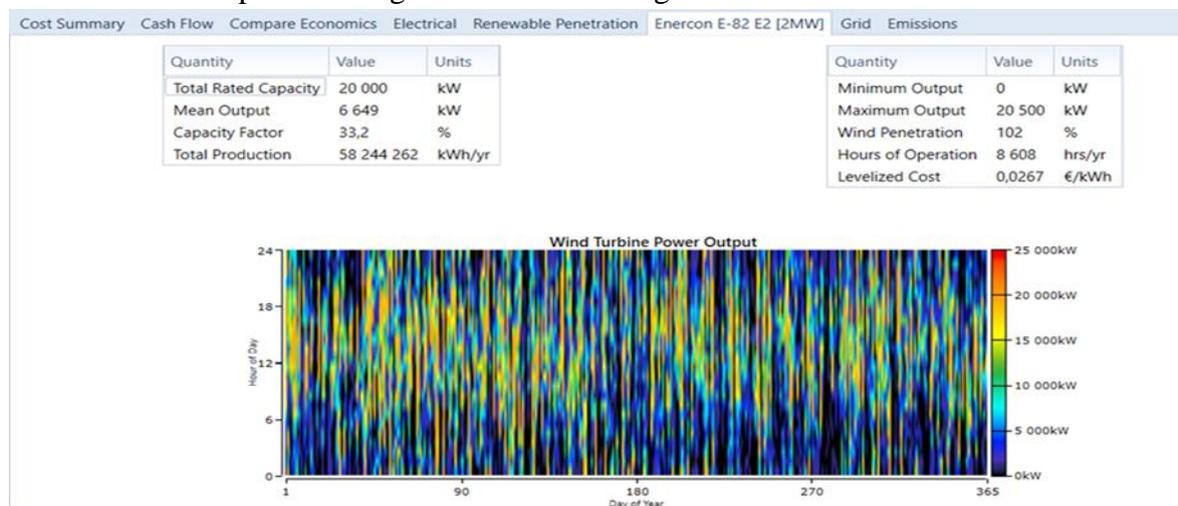


Figure (III .11): la production annuelle d’électricité par la turbine éolienne.

Tableau (III .12) : Résume les paramètres de fonctionnement de la ferme éolienne

PRODUCTION	QUANTITE	PRODUCTION	QUANTITE
Puissance utile	20,000 KW	Puissance moyenne	6,649 KW
Production total	58, 244,262 KWh/an	Puissance minimale	00 KW
Puissance maximale	20,500 KW	Pénétration	102%

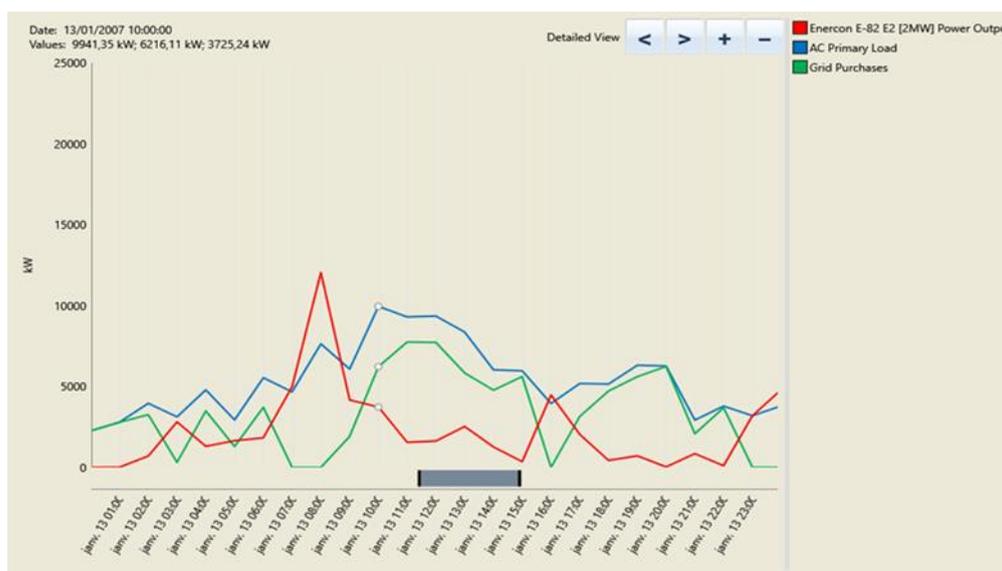


Figure (III .12) : Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois janvier pour la production du éolien, la charge principale AC, et les achats d'électricité du réseau.

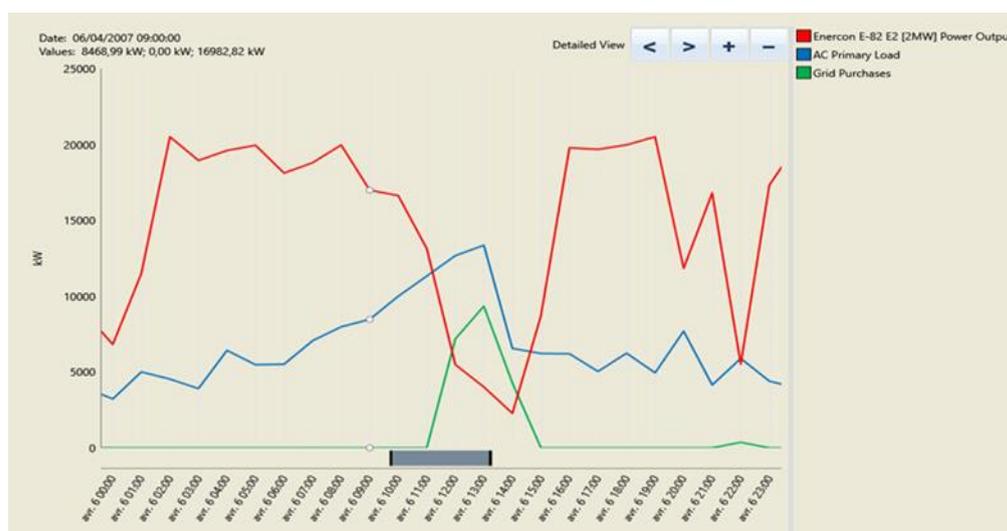


Figure (III .13): Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois Avril pour la production du éolien, la charge principale AC, et les achats d'électricité du réseau.

-Dans la figure (III .12) nous avons observé une consommation de charge moyenne élevée, variant entre 4500 kW et 10000 KW, on remarque que l'énergie éolienne est disponible et faible tout au long

Chapitre III : Simulation de fonctionnement du système hybride

de la journée entre 0KW et 5000KW. Atteignant un pic de production de 13000 kW vers 8h00. Le réseau oscille entre 0KW et 8000 KW tout au long de la journée.

- Dans la figure (III.13) une consommation de charge moyenne significative est observée, oscillant entre 3000 kW et 14000 kW. on remarque que l'énergie éolienne est disponible et oscille tout au long de la journée entre 5000KW et 20000KW, Atteignant un chute de production de 1000 kW vers 14h00, le réseau électrique fournit une puissance entre 11h00 et 15h00 et atteignant un pic de 9000 kW vers 13 h00.

III.7.2- Fonctionnement et performances optimales du réseau:

L'énergie achetée du réseau de 3,200 kW à 9,600 kW, dans une journée de 08h à 18h, l'énergie Totale vendue au réseau est de 4,000 kW à 8,000KW de18h à 8h. Ce système est rentable et productif figure (III .14).

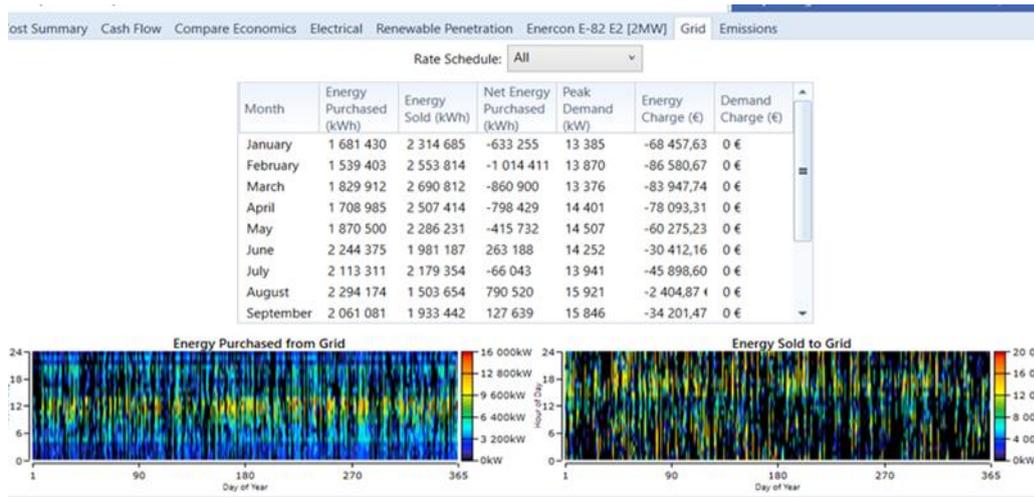


Figure (III .14) : L'énergie vendue et achetée du réseau en fonction des heures de la journée.

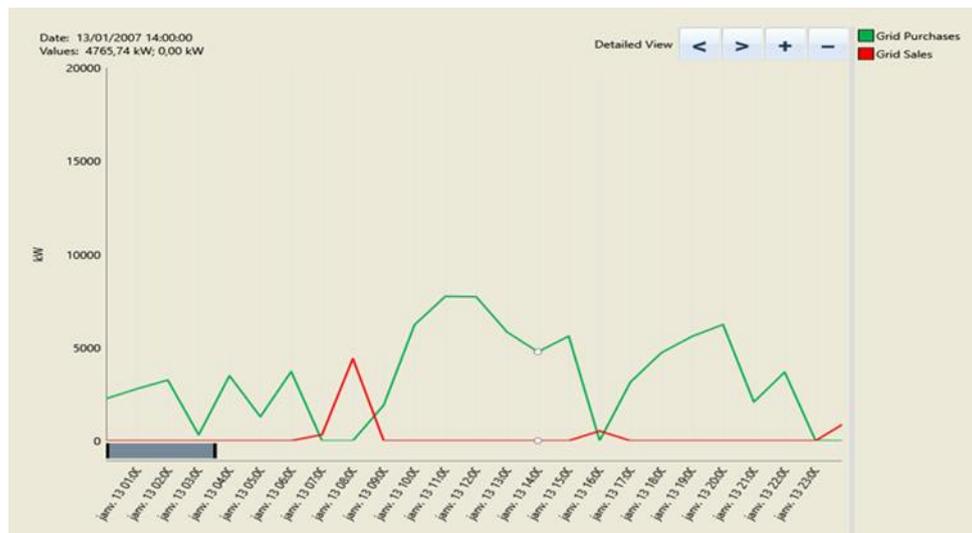


Figure (III .15) : Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois janvier pour les achats et ventes de réseau en kW



Figure (III.16) : Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois Avril pour les achats et ventes de réseau en KW

-Pour le figure (III.15) on remarque que de 7h00 à 9h00 que la vente de réseau est 0 KW, et entre 7h00 et 9h00 il augmente et atteint 5000 KW, l'achat de réseau de réseau s'arrêtent entre 7h00 et 8h00 et augmentent entre 8h00 et 7h00.

-Pour le figure (III.16) on remarque de 9h00 à 7h00 que la vente est élevée, atteignant 16000 kW à 2h00, alors que de 11heures a 15heures, l'achat de réseau est élevés, environ 9000 kW a 13heures, et le vente n'est pas disponible.

III.7.3- La répartition des coûts de l'installation

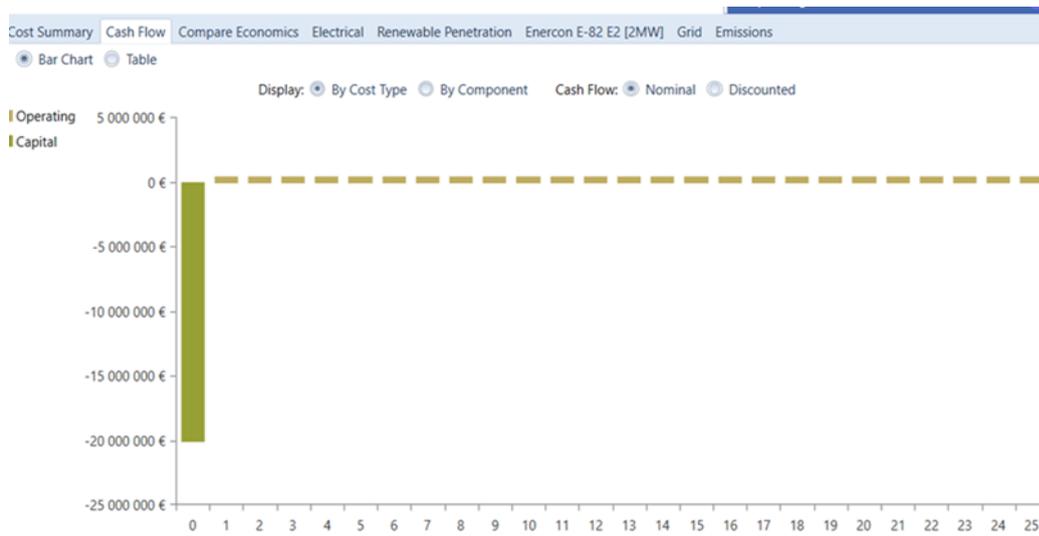


Figure (III .17) : Résumé des opérations et des remplacements pendant toute la durée de fonctionnement du système.

III.7.4- la production énergétique du système étudié :

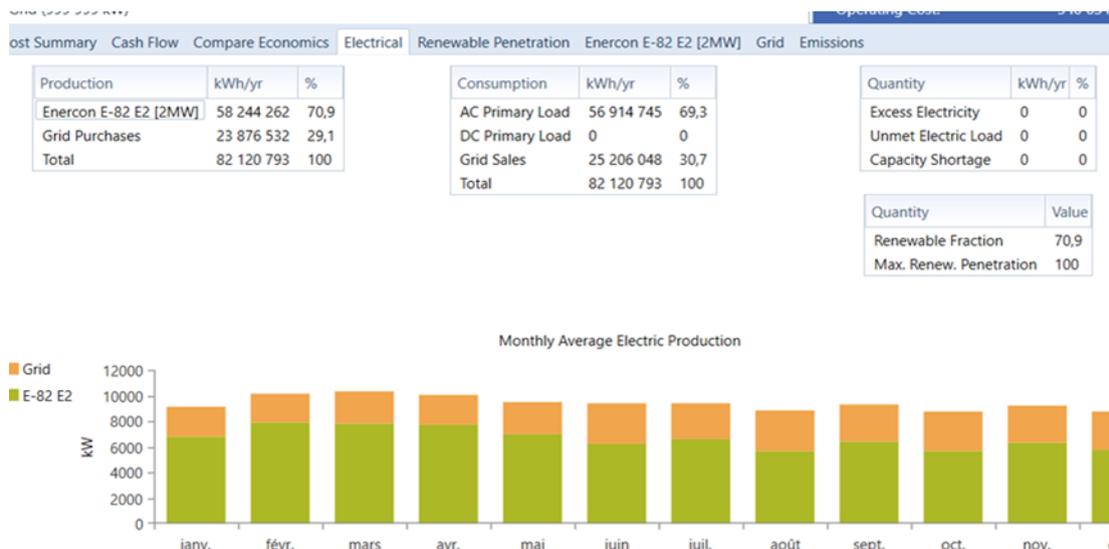


Figure (III .18) : la production énergétique du système hybride

Dans la figure (III.18), on note que 70.9% de l'énergie annuelle produite par le système est une énergie éolien, tandis que 29.1% est le réseau électrique.

Tableau (III.3) : Le taux de production annuelle par chaque source.

PRODUCTION	KW /année	%
EOLIEN	58244262	70.9%
GRID	23876532	29.1%
TOTALE	82120793	100%

III.7.5 comparaison économique :

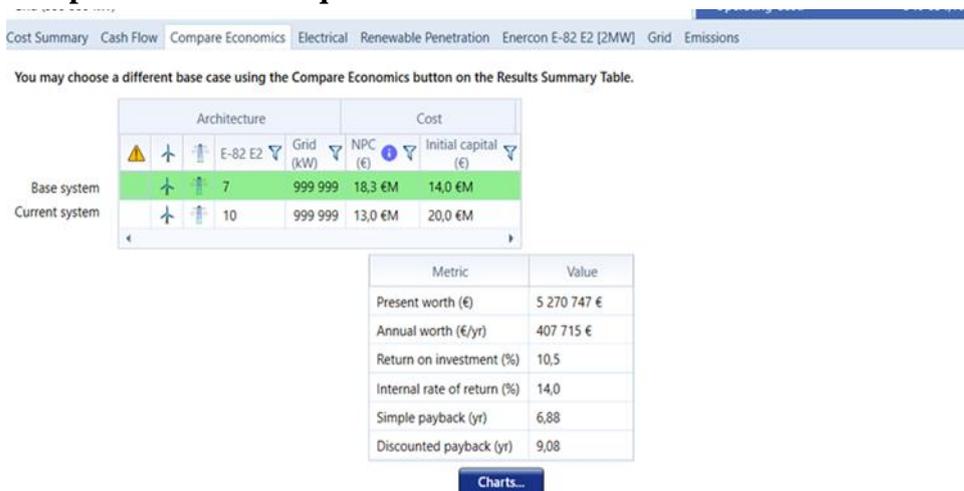


Figure (III.19) : comparaison économique de système optimal.

III.7.6- Les Indices économique :

La figure suivante met en évidence l'apparition de l'énergie générée à partir du système optimal. Ceci illustre comment les sources d'énergie renouvelables étudiées interviennent dans la production d'électricité, leurs contributions variant en fonction des ressources disponibles à l'emplacement choisi et des technologies employée.

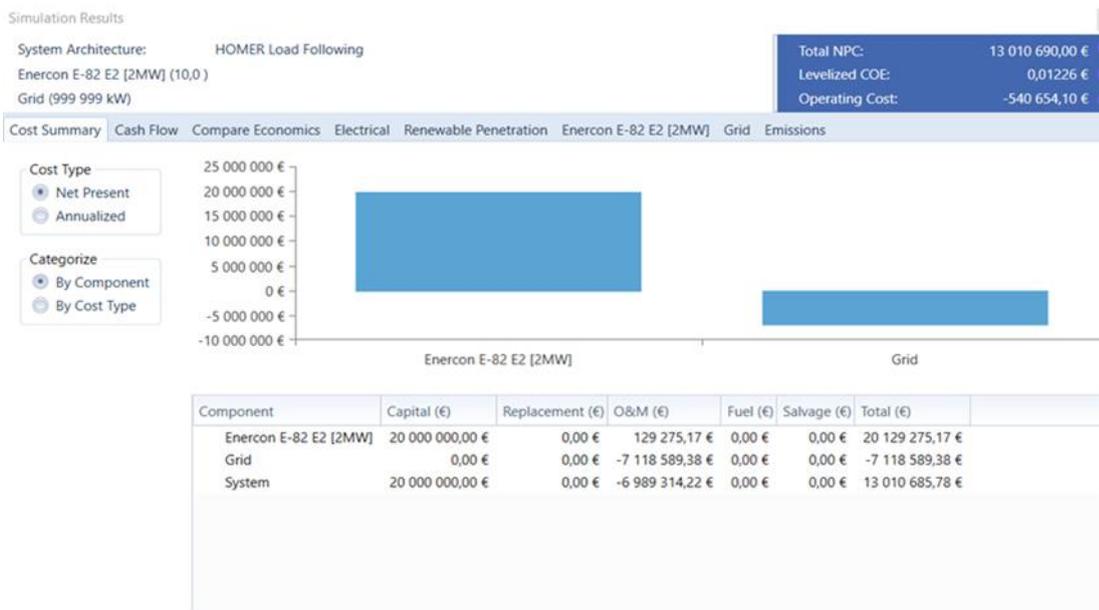


Figure (III .20): Récapitulatif du cout

III.7.7- Les paramètres économiques du système :

Tableau (III.4) : Les paramètres économique du système

Total NPC	€13.010.690.00
Levelized COE	€0.01226
Operating Cost	-€540.654.10

III.8 La configuration du PV avec convertisseur connecté au réseau

L'architecture du système étudiée à dimensionner sous HOMER est présentée dans la figure (III.21)

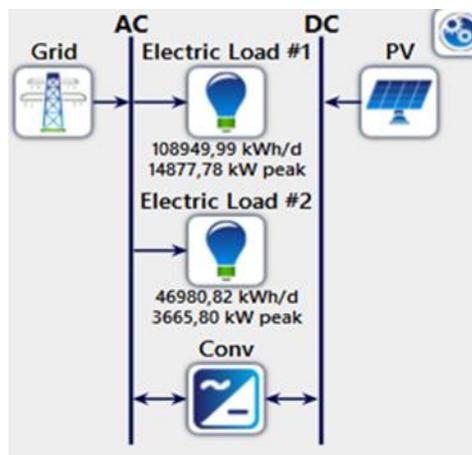


Figure (III .21) : Configuration du système PV avec convertisseur connecté au réseau.

III.9- Résultats de simulation :

La configuration optimale du système PV/réseau obtenus par simulation de Homer est illustrée sur la figure (III.22). Cette configuration contient 20000kW de photovoltaïque, et un convertisseur de 19000KW et de réseau électrique.

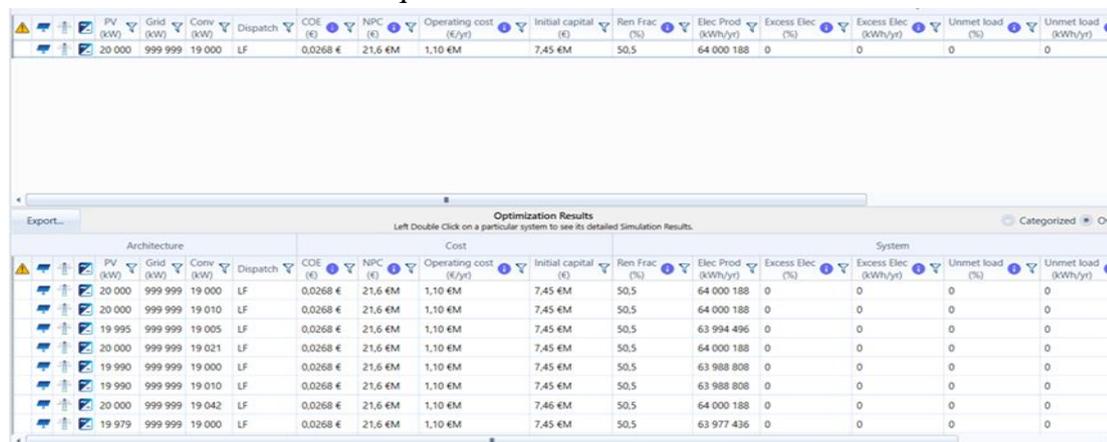


Figure (III .22): la configuration optimale donnée par Homer.

III.9.1- L'énergie produite système PV :

Le graphe de la figure (III.23) représente l'énergie annuelle produite par le champ PV.

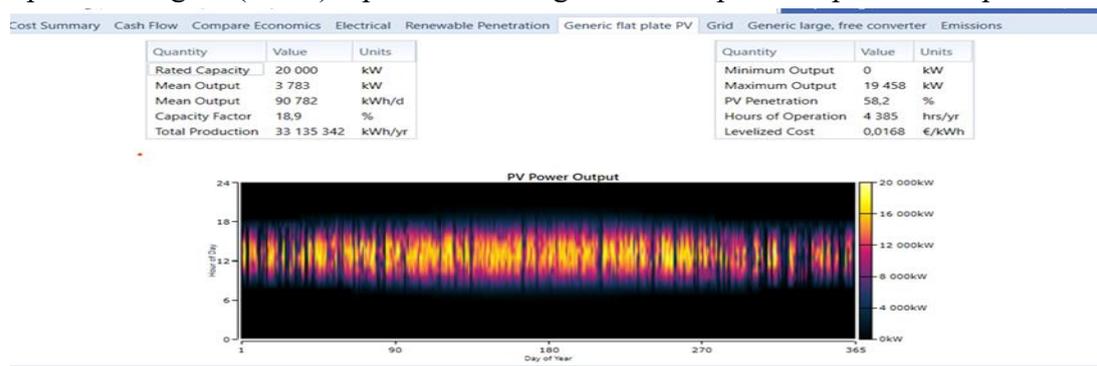


Figure (III .23) : La production électrique annuelle du champ PV.

Le générateur photovoltaïque est opérationnel pendant 4385 heures chaque année, ce qui correspond à une moyenne de 12 heures par jour. Cette durée peut varier d'une saison à l'autre en fonction de l'inclinaison de la terre par rapport au soleil et de la latitude de la région concernée.

Tableau (III.5) : les paramètres de fonctionnement du GPv

PRODUCTION	QUANTITE	PRODUCTION	QUANTITE
PUISSANCE UTILE	20,000 KW	PUISSANCE MOYENNE	3,783 KW
PRODUCTION MOYENNE	90,782 KWh/J	FACTEUR DE CAPACITE	18,9%
PRODUCTION TOTALE	33, 135,342	PUISSANCE MINIMALE	0 KW
PUISSANCE MAXIMALE	19,458 KW	PENETRATION	58.2%
HEURS DE FONCTIONNEMENT	4,385 h	COUT ACTUALISE	0.0168 €/kWh



Figure (III .24) : Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois janvier pour la production du PV, la charge principale AC, et les achats d'électricité du réseau.

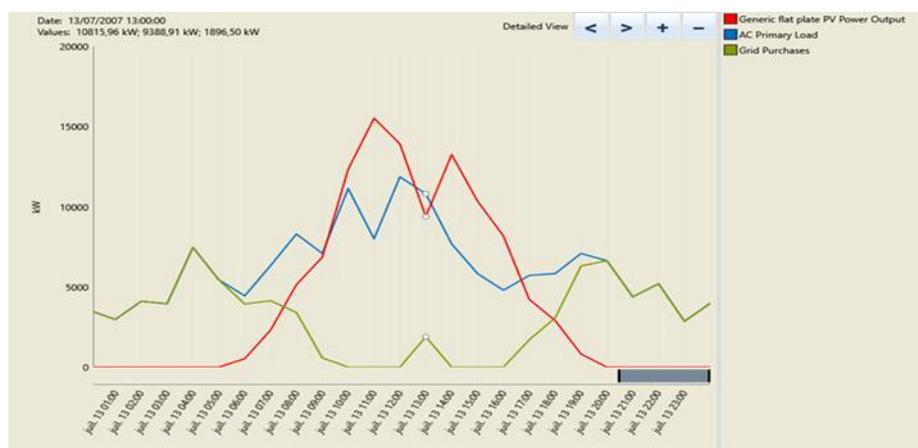


Figure (III .25) : Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois juillet pour la production du PV, la charge principale AC, et les achats d'électricité du réseau

-Dans la figure (III.24) nous avons observé une consommation de charge moyenne élevée, variant entre 4500 kW et 10000 kW, principalement de 18h00 à 7h00, période pendant laquelle l'énergie solaire n'est pas disponible. Pendant cette période, le réseau électrique fournit une puissance moyenne de 5000 kW pour alimenter des charges, qui fonctionnent en continu tout au long de la journée. Aucune énergie n'est produite par le système photovoltaïque durant cette période. À partir de 7h00 jusqu'à 18h00, l'énergie solaire devient disponible, ce qui entraîne la déconnexion du réseau électrique. Le générateur photovoltaïque produit alors de l'énergie électrique, atteignant un pic de production de 14400 kW vers 13h00. Pendant cette période, la charge est alimentée par le système photovoltaïque.

-Dans la figure (III .25) une consommation de charge moyenne significative est observée, oscillant entre 5000 kW et 12000 kW, en raison du fonctionnement des dispositifs de refroidissement pendant cette période. De 20h00 à 5h00, lorsque l'énergie solaire n'est pas disponible, le réseau électrique fournit une puissance moyenne de 7500 kW pour alimenter les charges critiques. Aucune énergie n'est produite par le système photovoltaïque pendant cette période nocturne. À partir de 5h00 jusqu'à 20h00, l'énergie solaire devient disponible, ce qui entraîne la déconnexion du réseau électrique. Le

Chapitre III : Simulation de fonctionnement du système hybride

générateur photovoltaïque produit alors de l'énergie électrique, atteignant un pic de production de 15100 kW vers 11h00. Pendant cette période, la charge est alimentée par le système photovoltaïque.

III.9.2- Fonctionnement et performances optimales du convertisseur:

Dans la figure (III .26) représente les puissances entré et sortie du convertisseur :

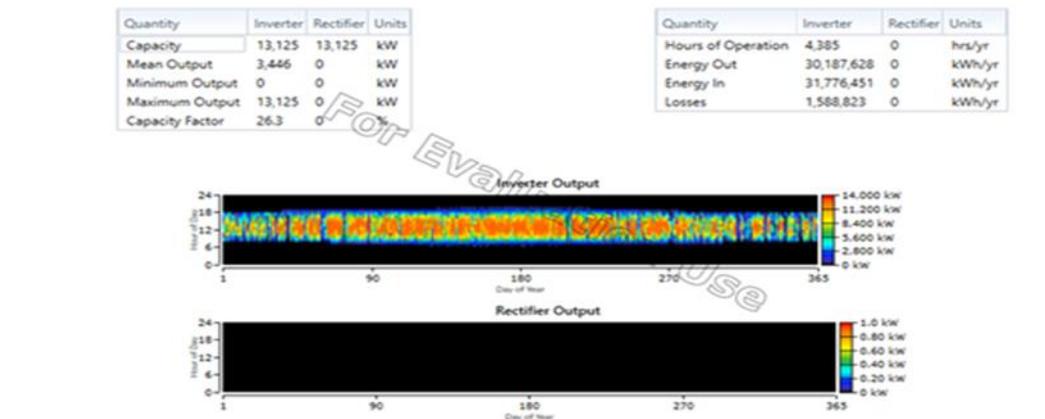


Figure (III .26) : la puissance d'entrée et sortie de convertisseur

Les courbes montrent aussi que les pertes du convertisseur sont faibles.

III.9.3-Réseaux électriques :

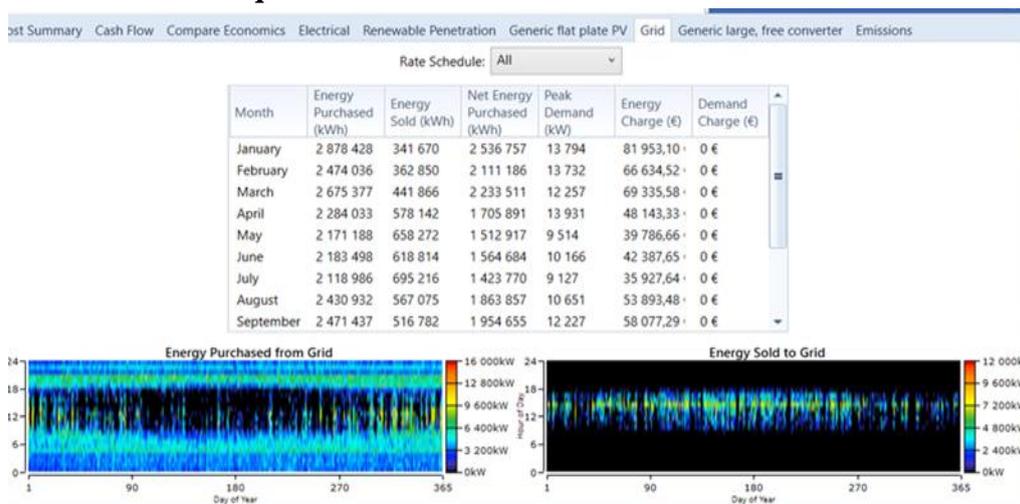


Figure (III.27) : L'énergie vendue et achetée du réseau en fonction des heures de la journée.

Entre 8h et 18h chaque jour, la quantité d'énergie achetée du réseau oscille entre 6400 kW et 12 000 kW. Pendant cette période, la demande est à son apogée. En revanche, entre 18h et 8h, lorsque la demande diminue, l'énergie totale vendue au réseau varie entre 4800 kW et 75000 kW. Ces fluctuations sont mises en évidence dans la figure (III .27), confirmant ainsi la rentabilité et la productivité du système analysé.

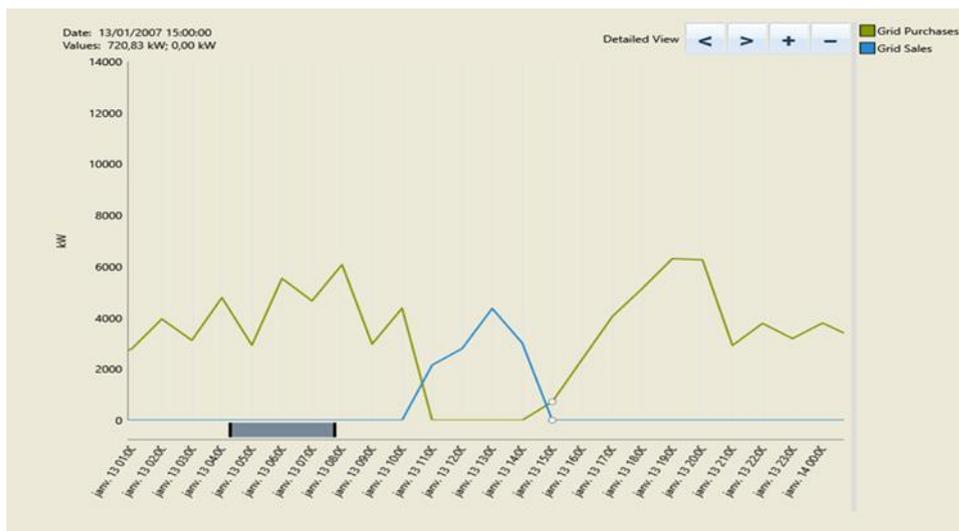


Figure (III.28): Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois janvier pour les achats et ventes de réseau en KW



Figure (III.29) : Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois juillet pour les achats et ventes de réseau en KW

Pour La figure (III .28) on remarque que de 15h00 à 10h00 que la vente de réseau est 0 KW, et entre 10h00 et 15h00 il augmente et atteint 4500 KW vers 13h00.

Pour La figure (III.29) on remarque de 16h00 à 9h00 que l'achat se situe entre 3000KW et 8000 KW, et entre 12h00 et 14h00 il atteint 2000KW, le vente est 0KW.entre 10h00 et 17h00 le vente est disponible .atteignant un pic de 7000 KW vers 11h00 tandis que l'achat est 0 KW.

III.9.4- La répartition des coûts de l'installation

On remarque sur la Figure (III.30) que Le (NPC) représente la somme actualisée de tous les coûts (investissement initial, remplacement, fonctionnement) sur la durée de vie du projet est de 21 613 690,00 €

Le COE (Coût de l'Énergie) est le coût moyen de production d'un kilowattheure d'électricité sur la durée de vie du système s'élève à 0,02682 €/kWh. Le Coût de fonctionnement total durant la période de vie du système atteint la valeur de 1 095 624,00 €



Figure (III.30): Résumé des opérations et des remplacements pendant toute la durée de fonctionnement du système

III.9.5- la production énergétique du système étudié :

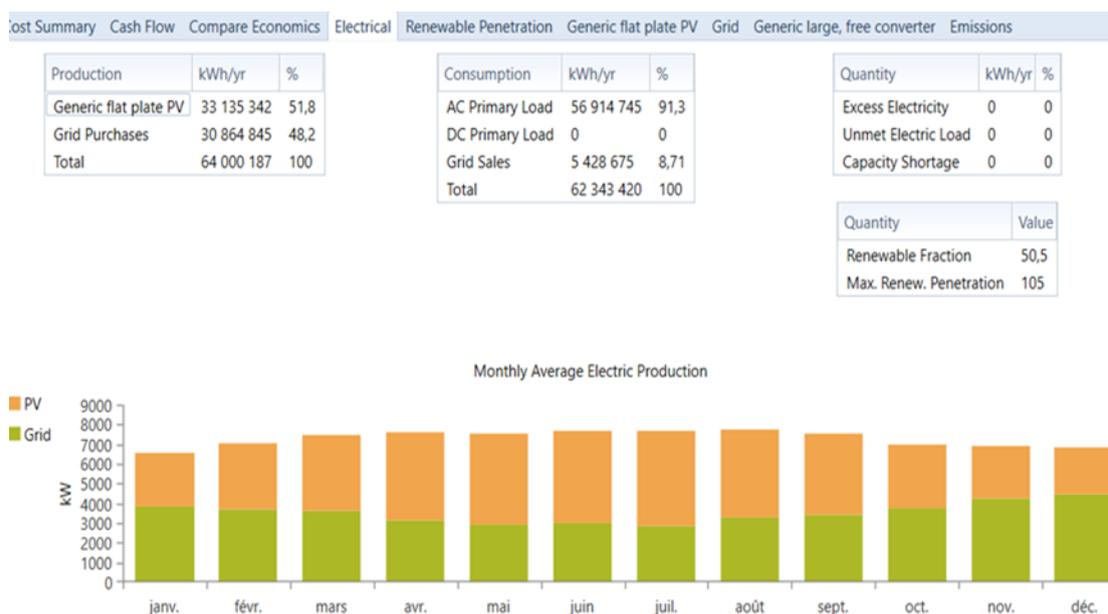


Figure (III .31): la production énergétique du système étudié

Dans la figure (III .31), on note que 51.8% de l'énergie annuelle produite par le système est une énergie photovoltaïque, tandis que 48.2% est le réseau électrique.

Tableau (III.6) : Le taux de production annuelle par chaque source.

PRODUCTION	KW /année	%
PV	33135342	51.8%
GRID	30864845	48.2%
TOTALE	64000187	100%

III.9.6- La compare économique :



Figure (III .32): la compare économique de système optimal

III.9.7- Les Indices économique :

Dans la figure (III .33) suivante, il est notable de constater l'intégration de l'énergie produite par le système optimal. Ainsi, les sources d'énergie renouvelables examinées contribuent à la production d'électricité dans des proportions variables, influencées par les gisements disponibles à l'emplacement choisi ainsi que par la technologie sélectionnée.

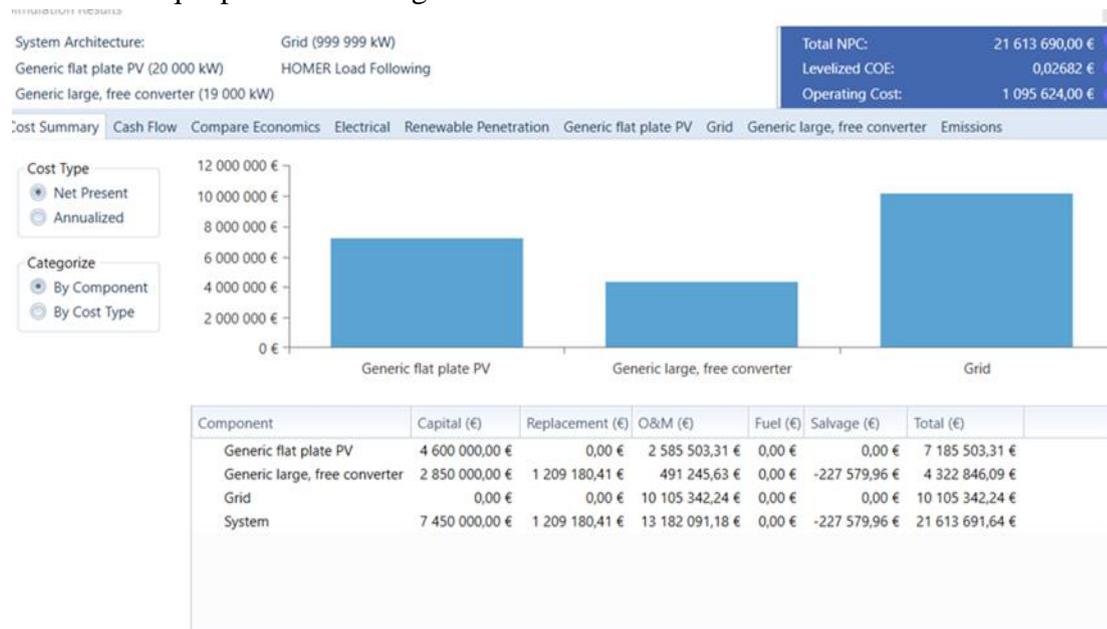


Figure (III .33) : Récapitulatif du cout

III.9.8- Les paramètres économiques du système :

Tableau (III.7) : Les paramètres économique du système

Total NPC	€21.613.690.00
Levelized COE	€0.02682
Operating Cost	€1.095.624.00

III.10- Création du système hybride :

Dans le cadre de notre étude sur l'environnement HOMER, nous avons minutieusement détaillé chaque composant de notre projet, en nous appuyant sur une analyse approfondie des données et des caractéristiques fournies. Avant même de procéder à l'installation, nous avons évalué le potentiel des sources d'énergie renouvelable disponibles, notamment solaire et éolien.

La simulation réalisée dans l'environnement HOMER nous a permis de répondre précisément aux objectifs définis dans notre proposition initiale, tout en démontrant la viabilité de notre système hybride envisagé. Sur la figure ((III .34), vous trouverez une représentation de l'installation, mettant en avant le système hybride photovoltaïque-éolien connecté au réseau, tel que modélisé dans l'interface HOMER.

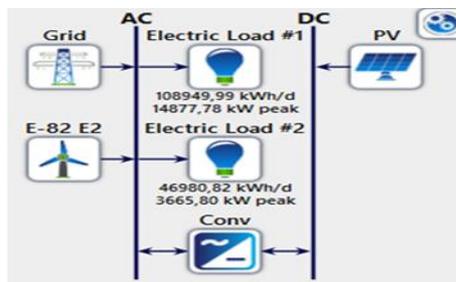


Figure (III .34): Configuration du système hybride

III.10.1- Les configurations du système hybride :

Cette étude nous a permis de simuler des centaines de combinaisons de configurations d'un système hybride à partir de plusieurs dimensions et nombres de composants. Nous allons dans cette partie présenter les caractéristiques techniques et économiques du système optimal. La configuration optimale du système hybride PV/éolien/réseau obtenus par simulation de Homer est illustrée sur la figure (III.35). Cette configuration contient 20000kW de photovoltaïque, 999.999 kW réseaux, 10 turbines et un convertisseur de 20000kW.

Architecture							Cost				System			
PV (kW)	E-82 E2	Grid (kW)	Conv (kW)	Dispatch	COE (€)	NPC (€)	Operating cost (€/yr)	Initial capital (€)	Ren Frac (%)	Elec Prod (kWh/yr)	Excess Elec (%)	Excess Elec (kWh/yr)	Unmet load (%)	Unmet load (kWh/yr)
20 000	10	999 999	20 000	LF	0,00387 €	5,15 €M	-1,74 €M	27,6 €M	87,2	104 494 424	0	0	0	0
	10	999 999		LF	0,0123 €	13,0 €M	-540 654 €	20,0 €M	70,9	82 120 792	0	0	0	0
20 000		999 999	20 000	LF	0,0271 €	21,8 €M	1,10 €M	7,60 €M	50,5	64 000 188	0	0	0	0

Figure (III .35): la configuration optimale donnée par Homer

III.10.2 L'énergie produite par le système PV :

Le générateur photovoltaïque fonctionne 4385 heures par année ce qui est équivalent à 12 heures par jour. Cette période diffère d'une saison à l'autre suivant la déclinaison de la terre par rapport au soleil et de la latitude de chaque région.

Le graphe de la figure (III.36) représente l'énergie annuelle produite par le champ PV.

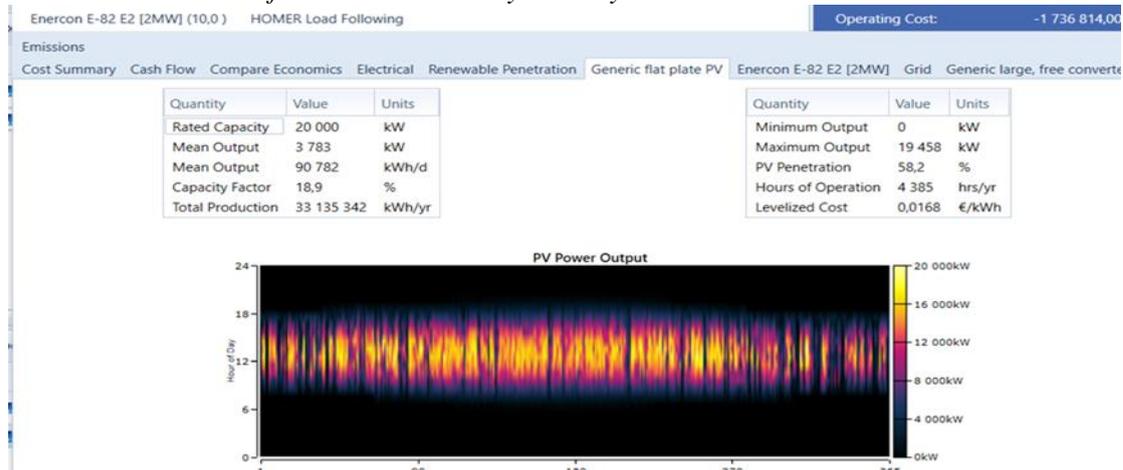


Figure (III.36) : La production électrique annuelle du champ PV

Tableau (III.8) : les paramètres de fonctionnement du GPv

PRODUCTION	QUANTITE	PRODUCTION	QUANTITE
Puissance utile	20,000 KW	Puissance moyenne	3,783 KW
Production moyenne	90,782 KWh/J	Facteur de capacité	18,9%
Production totale	33, 135,342 KWh/ans	Puissance minimale	0 KW
Puissance maximale	19,458 KW	Pénétration	58,2%
Heurs de fonctionnements	4,385 h	Cout actualise	0,0168 €/kWh

III.10.3- L'énergie produite par les turbines éoliennes :

La figure (III.37), présente le fonctionnement de l'éolienne, la capacité totale est 2640 kW et une production totale de 6623 kWh/jour. Le volume horaire de fonctionnement est égal à 7479 heures par an avec un minimum de 2680 kW. Le Maps présenté dans cette figure montre que les valeurs de production sont très important (jaune ou rouge) pour plusieurs heures de la journée. Donc on peut déduire que cette énergie est capable de compléter l'énergie solaire dans cette zone.

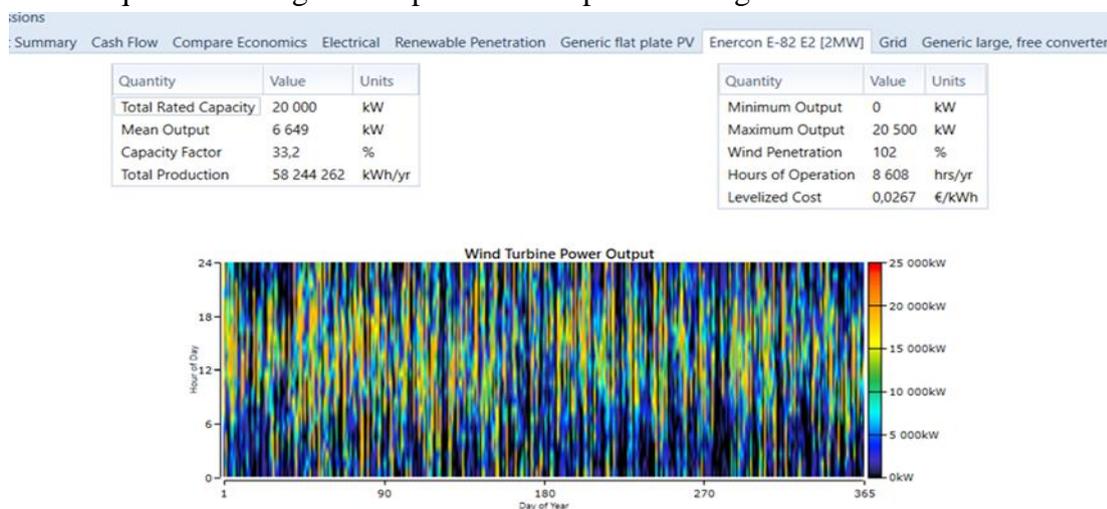


Figure (III.37) : la production annuelle d'électricité par la turbine éolienne

Tableau (III.9): Résumé les paramètres de fonctionnement de la ferme éolienne

PRODUCTION	QUANTITE	PRODUCTION	QUANTITE
Puissance utile	20,000 KW	Puissance moyenne	6,649 KW
Production total	58, 244,262 KWh/ans	Puissance minimale	00 KW
Puissance maximale	20,500 KW	Pénétration	102%

La vitesse du vent affecte proportionnellement l'énergie produite par l'éolienne. La puissance augmente lorsque la vitesse du vent est élevée et l'éolienne peut s'arrêter. Lorsque la vitesse du vent tombe à une faible valeur ou que le vent est trop fort.

III.10.4- Fonctionnement et performances optimales du convertisseur:

Dans la figure (III .38) représente les puissances entré et sortie du convertisseur.

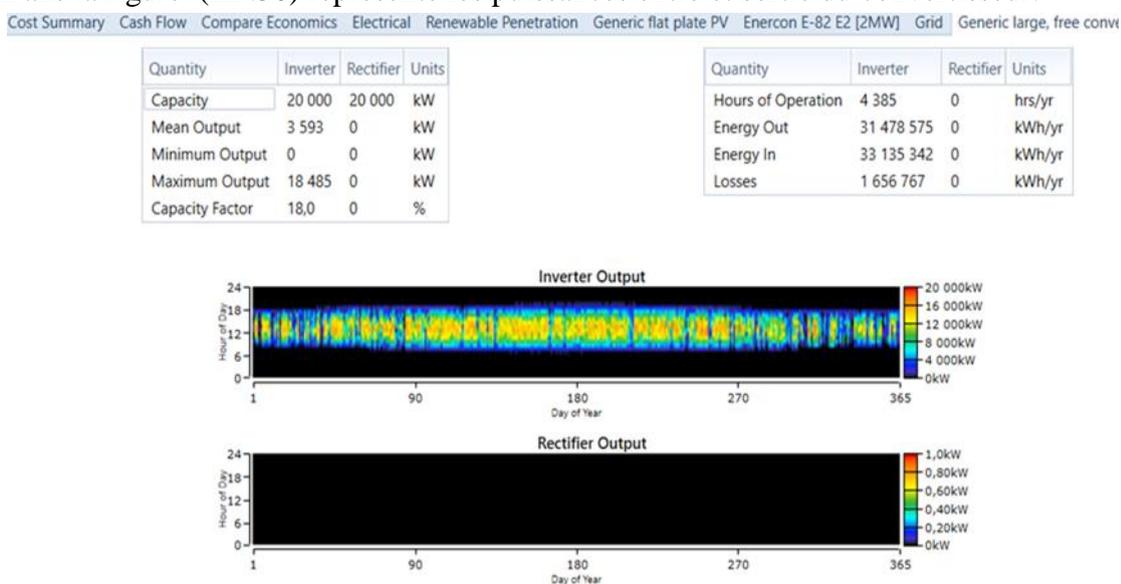


Figure (III.38) : la puissance d'entrée et sortie de convertisseur

Dans la représentation visuelle fournie dans la figure (III.38), il est observé que l'onduleur fonctionne à sa capacité maximale de 8000 kW à 14000 kW de 8h00 à 18h00. Ces plages horaires correspondent aux heures de la journée pendant lesquelles les panneaux solaires produisent de l'électricité en courant continu, convertie ensuite en courant alternatif pour alimenter les divers appareils électriques.

Chapitre III : Simulation de fonctionnement du système hybride

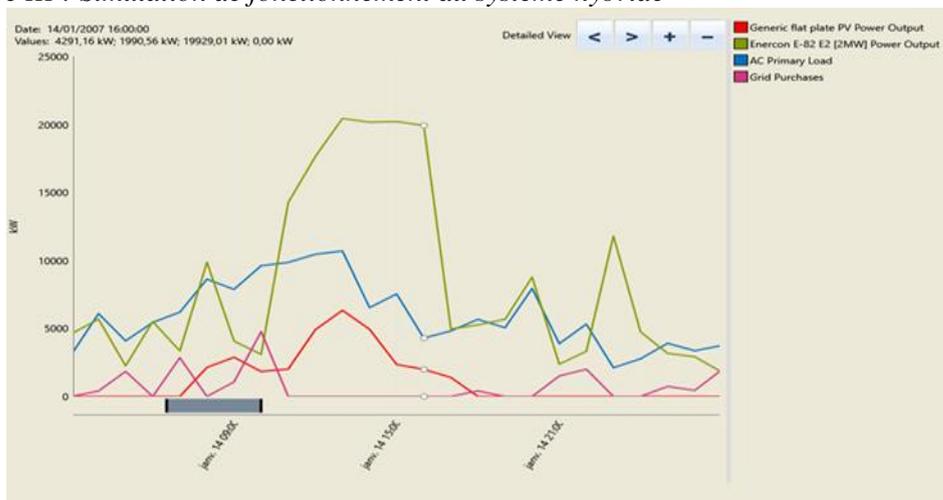


Figure (III.39): Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois janvier pour la production du Eolien, production du PV, la charge principale AC, et les achats d'électricité du réseau . système (PV/Eolien/Réseau).

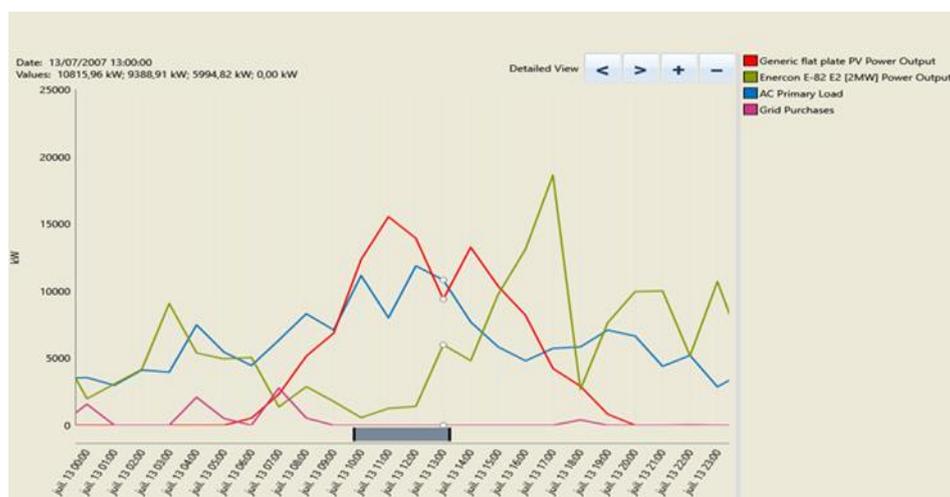


Figure (III.40) : Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois juillet pour la production du Eolien, production du PV, la charge principale AC, et les achats d'électricité du réseau . système (PV/Eolien/Réseau).

-Dans la figure (III.39) nous avons observé une consommation de charge moyenne élevée, variant entre 2000 kW et 11000 kW, principalement de 18h00 à 7h00, période pendant laquelle l'énergie solaire n'est pas disponible. Pendant cette période, le réseau électrique fournit une puissance faible entre 0kW et 1000 kW par ce que l'énergie éolienne est disponible qui fonctionnent en continu tout au long de la journée Atteignant un pic de production de 20000 kW entre 10h00 et 17h00. À partir de 7h00 jusqu'à 18h00, l'énergie solaire devient disponible, ce qui entraîne la déconnexion du réseau électrique. Le générateur photovoltaïque produit alors de l'énergie électrique, atteignant de production de 6000 kW vers 12h00.

-Dans la figure (III.40) une consommation de charge moyenne significative est observée, oscillant entre 3000 kW et 12000 kW, en raison du fonctionnement des dispositifs de refroidissement pendant cette période. De 20h00 à 5h00, lorsque l'énergie solaire n'est pas disponible, l'énergie éolienne est disponible qui fonctionnent en continu tout au long de la journée et Atteignant un pic de production de 20000 kW vers 17h00, le réseau électrique est déconnecter. À partir de 5h00 jusqu'à 20h00, l'énergie solaire devient disponible, ce qui entraîne

Chapitre III : Simulation de fonctionnement du système hybride

la déconnexion du réseau électrique. Le générateur photovoltaïque produit alors de l'énergie électrique, atteignant un pic de production de 15100 kW vers 11h00. Pendant cette période, l'énergie éolienne est très faible.

III.10.5 Fonctionnement et performances optimales du réseau:

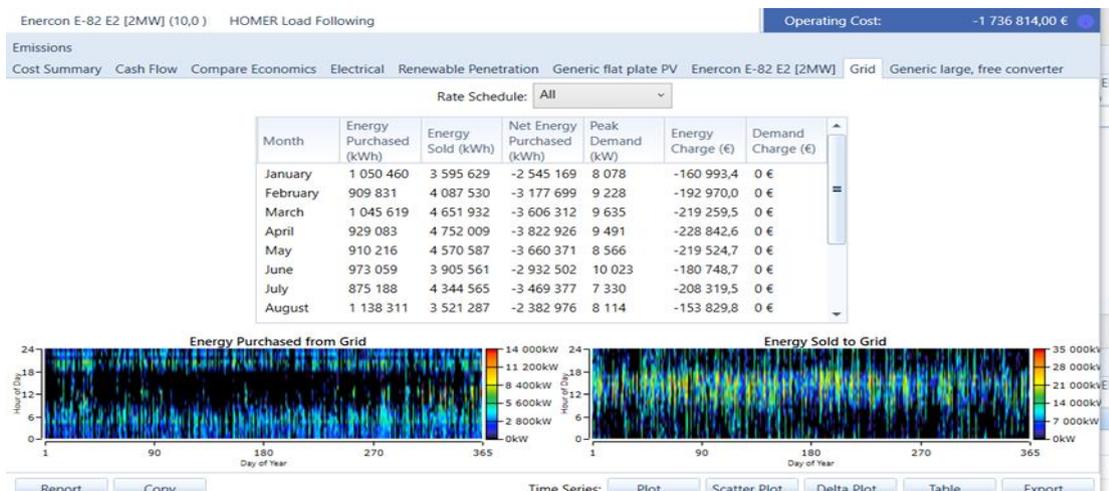


Figure (III .41) : L'énergie vendue et achetée du réseau en fonction des heures de la journée

-La quantité d'énergie achetée du réseau varie entre 28000 kW et 56000 kW. Cette plage horaire s'étend de 8h à 18h chaque jour. En revanche, entre 18h et 8h, l'énergie totale vendue au réseau fluctue entre 7000 kW et 25000 kW. Cette analyse, illustrée dans la figure (III.41), démontre la rentabilité et la productivité du système étudié.

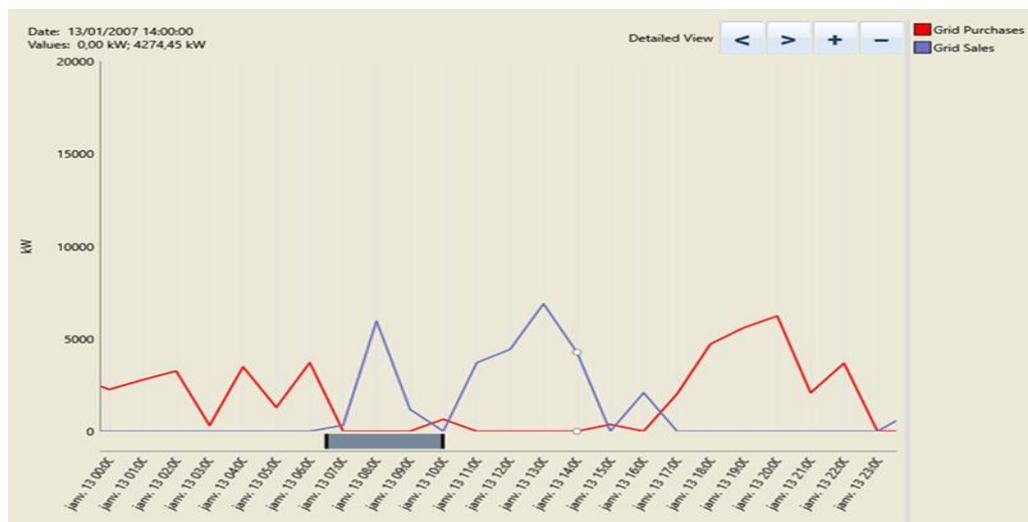


Figure (III .42) : Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois janvier pour les achats et ventes de réseau en KW

Chapitre III : Simulation de fonctionnement du système hybride

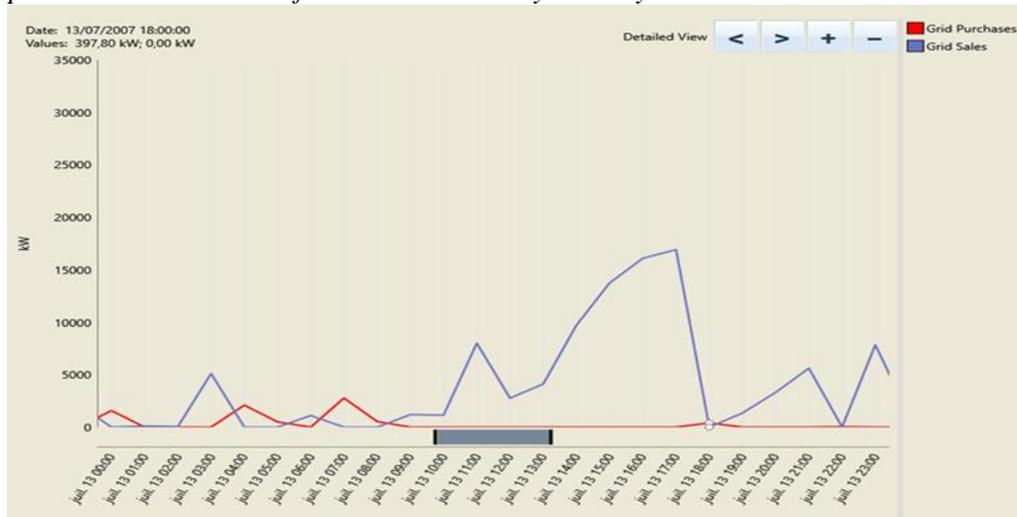


Figure (III.43) : Présentation des moments critiques d'une journée typique du mois juillet pour les achats et ventes de réseau en KW

Pour La figure (III.42) on remarque que de 7h00 à 17h00 que la vente de réseau est oscille entre 0 KW et 7000KW et l'achat de réseau n'est pas disponible, et entre 16h00 et 7h00 l'achat de réseau est oscille entre 0 KW et 6000KW et la vente n'est pas disponible

Pour La figure (III.43) on remarque que l'achat est presque prêt, atteignant 1000 KW vers 7h00. tandis que la vente est disponible. Atteignant un pic de 17000 KW vers 17h00.

III.10.6 La répartition des coûts de l'installation



Figure (III.44) : Résumé des opérations et des remplacements pendant toute la durée de fonctionnement du système.

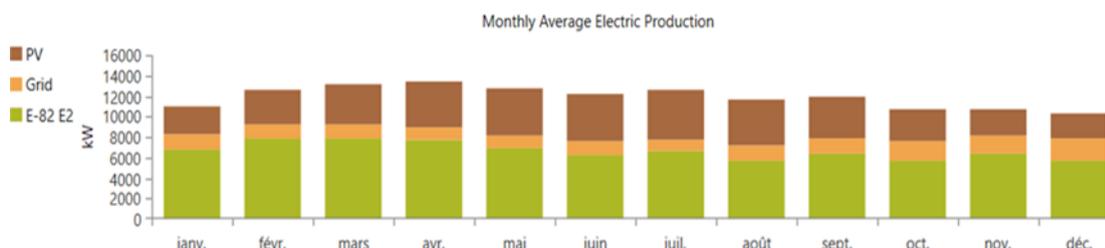
III.10.7- Production énergétique du système hybride optimal :

La figure (III.45) représente la production énergétique du système hybride

Chapitre III : Simulation de fonctionnement du système hybride

Production			Consumption			Quantity		
	kWh/yr	%		kWh/yr	%		kWh/yr	%
Generic flat plate PV	33 135 342	31,7	AC Primary Load	56 914 745	55,3	Excess Electricity	0	0
Enercon E-82 E2 [2MW]	58 244 262	55,7	DC Primary Load	0	0	Unmet Electric Load	0	0
Grid Purchases	13 114 823	12,6	Grid Sales	45 922 915	44,7	Capacity Shortage	0	0
Total	104 494 427	100	Total	102 837 660	100			

Quantity	Value
Renewable Fraction	87,2
Max. Renew. Penetration	105



La figure (III.45) : la production énergétique du système hybride

Dans la figure (III.45), on note que 31.7% de l'énergie annuelle produite par le système est une énergie photovoltaïque, tandis que 55.7% de cette énergie est une énergie éolienne. 12.4% sont produites par Le réseau électrique.

Tableau (III.10) : Le taux de production annuelle par chaque source

PRODUCTION	KW /année	%
PV	33.135.342	31.7%
EOLIEN	58.244.262	55.7%
GRID	13.114.823	12.6%
TOTALE	104.494.427	100%

III.10.8- Comparaison économique :

simulation results

System Architecture: Generic large, free converter (20 000 kW)
 Generic flat plate PV (20 000 kW) Grid (999 999 kW)
 Enercon E-82 E2 [2MW] (10.0) HOMER Load Following

Total NPC: 5 147 308,00 €
 Levelized COE: 0,003872 €
 Operating Cost: -1 736 814,00 €

Emissions

Cost Summary Cash Flow Compare Economics Electrical Renewable Penetration Generic flat plate PV Enercon E-82 E2 [2MW] Grid Generic large, free converter

You may choose a different base case using the Compare Economics button on the Results Summary Table.

	Architecture				Cost	
	PV (kW)	E-82 E2	Grid (kW)	Conv (kW)	NPC (€)	Initial capital (€)
Base system	20 000		999 999	20 000	21,8 €M	7,60 €M
Current system	20 000	10	999 999	20 000	5,15 €M	27,6 €M

Metric	Value
Present worth (€)	16 693 910 €
Annual worth (€/yr)	1 291 347 €
Return on investment (%)	10,2
Internal rate of return (%)	13,6
Simple payback (yr)	7,05
Discounted payback (yr)	9,37

Figure (III.46): la compare économique de système optimal

III.10.9- Les Indices économique :

On remarquera sur la figure suivante (III.47) l'apparition de l'énergie produite à partir du système optimal, de sorte que les trois sources d'énergie renouvelables étudiées participent à la production d'électricité dans des proportions qui dépendent des gisements de l'emplacement choisi et de la technologie choisi.



Figure (III .47) : Récapitulatif du cout

-Le but du calcul économique est de trouver la configuration idéale parmi les solutions possibles qui fournit le type d'énergie requis au moindre coût. En outre, les systèmes d'énergie renouvelable sont souvent comparés aux systèmes conventionnels, bien que bon nombre de ces comparaisons ne tiennent pas compte de tous les avantages et coûts pour les économies nationales ou mondiales. Pour estimer le coût final, il est nécessaire d'intégrer tous les coûts de base, tels que les coûts d'installation, d'exploitation, de maintenance et de remplacement, ainsi que le coût de démantèlement du système, réduit à la quantité d'énergie produite (kilowattheures produites) sur la durée de vie de le système.

-Dans de nombreux cas, cependant, la réalité diffère des projections, ce qui peut modifier considérablement les coûts réels. Parmi ces paramètres, nous constatons que le coût annualisé total (CNP) est le coût total encouru pour acheter et entretenir l'équipement pendant sa durée de vie utile en tenant compte de l'effet des augmentations de coût (actualisation). Les concepteurs d'études utilisent traditionnellement le coût de l'énergie (COE) pour montrer la viabilité économique des systèmes hybrides d'énergie renouvelable. Cette métrique est considérée comme le premier objectif du problème d'optimisation. La minimisation des coûts d'exploitation et de maintenance d'O&M est également un indicateur très important pour la conception optimale des systèmes hybrides d'énergie renouvelable. Le tableau (3.9) résume les facteurs économiques de notre système obtenus par HOMER.

Tableau (III .11) : Les paramètres économique du système

Total NPC	€5.147.308.00
Levelized COE	€0.003872
Operating Cost	€-1.736.814.00

III.11- Comparaison entre 3 systèmes étudiés :

Tableau (III.12): Comparaison des différentes configurations

Configuration	Total NPC	Levelized COE	Operating Cost
(Eolien/Réseau)	€13.010.690.00	€0.01226	-€540.654.10
(PV/Réseau)	€21.613.690.00	€0.02682	€1.095.624.00
(PV/Eolien/Réseau)	€5.147.308.00	€0.003872	€-1.736.814.00

On remarque que le coût annuel total (NPC) de système (Éolien/Réseau) et le système (PV/Réseau) est élevé par rapport au système hybride (PV/Éolien/Réseau), également pour le cout d'énergie (COE) et les coûts d'exploitation et de maintenance d O&M. Le meilleur système d'un point de vue économique parmi ces système est le système hybride (PV/Eolien/Réseau).

III.12- Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulations sous logiciels Homer Pro.

Sur l'environnement Homer Pro, nous avons pu réaliser une évaluation technoeconomique suivie d'une étude comparative entre les systèmes (Eolien/Réseau),(PV/Réseau) et le système hybride (PV/Eolien/Réseau) . les résultats techniques ont montres le taux de participation de chaque source étaient acceptable. la simulation a montré qu'il y a une grande complémentarité entre les sources pour assure la production permanente suivant la demande de la charge.

D'un point de vue économique, cette simulation nous a permis de conclure que la configuration hybride (PV/Eolien/Réseau) offre une flexibilité en termes de fiabilité du système, assurant la disponibilité de la production électrique, ainsi qu'en termes de coût d'investissement par rapport les systèmes (Eolien/Réseau) et (PV/Réseau).Concernant les indices économiques de ce systèmes hybride nous avons conclut que le coût annuel total (NPC) et le coût de l'énergie (COE) explicitent clairement la viabilité économique des systèmes hybride d'énergie renouvelable .les coûts d'exploitation et de maintenance d O&M sont très minimises parce qu'il représenter un indicateur très important pour la conception optimal des systèmes hybrides. Enfin on peut dire que la réalisation d'un tel système dans ce site et très important pour la région de NAAMA.

Conclusion Générale

- Conclusion Générale

Dans le cadre de notre contribution au Programme National des Énergies Renouvelables, nous avons réalisé la conception optimale d'un système multi-source destiné à fournir une partie d'énergie renouvelable de la région de Mecheria - Naama en énergie. Notre système hybride combine un champ photovoltaïque, un parc éolien et le réseau électrique. Cette combinaison vise à résoudre les problèmes d'intermittence couramment associés aux énergies renouvelables, limitant ainsi leur capacité à remplacer les sources d'énergie traditionnelles. En permettant une production plus autonome, ce système contribue à soulager la pression sur le réseau électrique.

Dans notre étude, nous avons examiné divers aspects, débutant par une introduction générale sur les systèmes à énergie renouvelable, suivie de la définition des systèmes multi-source, des stratégies de gestion, des méthodes de dimensionnement et des critères d'évaluation des systèmes hybrides. Cette approche nous a permis de définir clairement nos objectifs. Nous avons commencé par collecter des données sur la vitesse du vent et le rayonnement solaire, confirmant un potentiel significatif dans la région.

Pour comprendre le fonctionnement de chaque sous-système, nous avons modélisé chaque composant du système hybride. Un schéma de gestion des puissances a été élaboré et un profil de charge électrique a été prédit. Nous avons ensuite réalisé des calculs détaillés pour évaluer les aspects économiques et techniques, confirmant et dimensionnant les différentes sources d'énergie à l'aide d'outils comme le logiciel Homer pour l'éolien et des méthodes classiques pour le photovoltaïque connecté au réseau. Nous avons simulé le fonctionnement du système pour déterminer la configuration optimale.

Les résultats de la simulation ont montré que chaque source contribuait significativement à la production d'électricité, en fonction de son potentiel respectif : environ 31.7 % de l'énergie annuelle provenait du photovoltaïque 55.7 % de l'éolien et 12.6 % du réseau. Sur le plan économique, le coût annuel total était estimé à 5.147 millions d'euros, avec un coût de production d'énergie de 0.003872 euro par kWh et des coûts d'entretien de -1.736.814.00 euros. Ces résultats économiques encourageants soutiennent la viabilité de tels projets comme alternatives aux sources d'énergie conventionnelles.

En conclusion, les systèmes énergétiques hybrides associant énergie éolienne et solaire offrent un potentiel prometteur pour la transition énergétique à court terme en Algérie. L'accent est aujourd'hui mis sur l'atteinte de l'indépendance énergétique, crucial pour le développement rural où l'accès à l'énergie est essentiel pour l'agriculture et l'élevage. Bien que cette étude n'ait pas couvert tous les aspects de l'hybridation des énergies renouvelables, nous espérons qu'elle incitera les décideurs politiques à investir dans l'efficacité énergétique et à promouvoir une économie basée sur les énergies renouvelables.

Reference bibliographies

- [1] World Energy Outlook, the 2022 edition of bp's Energy.
- [2] Imre M.Jánosi-KarimMedjdoub- MiklósVincze "Combined wind-solar electricity production potential over north-western Africa"Renewable and Sustainable Energy Reviews <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111558>
- [2] Fatima Zohra Bochra Amrani* , and All " Site suitability analysis of wind energy resources in different regions of Algeria's southwestern highland" Laboratory ERES university Mostaganem, Accepted: 12th Nov 2023; Available online: 22nd Nov 2023 Journal homepage: <https://ijred.undip.ac.id>
- [4] Abdelbari Redouane Abdelmajid Elbouardi Taib Ajzoul Hassan Ezbakhe "Study of a hybrid power generation system for independent use in Tétouan region of Morocco" 16th Days of International Thermal, Jith from 13 to November 15, 2013 in Marrakech, Morocco.
- [5] HAMITI Dalila « Etat des lieux des énergies renouvelables et de la stratégie d'efficacité énergétique en Algérie » Revue d' Etudes juridiques et Economiques ISSN 2602-7321/ EISSN 2773- 2649 Vol: 05 No: 02 Année: 2022 , université Abderrahmane MIRA de Bejaia,
- [6] GUEZGOUZ Mohammed ' (Perfectionnement et expertise des systèmes énergétiques complexes incorporant des sources renouvelables : Application au système hybride éolien-PV avec batteries sur un site national.) de l'université de Mostaganem le 2020.
- [7] Dr BOUTLILIS Fatima Polycopie de cours « 'Applications et dimensionnement des systèmes à énergies renouvelables » de l'université de Mostaganem Le 2021
- [8] Ferrah-Billel.pdf (Etude de système hybride PV –Eolien) Université de ANNABA le 2015
- [9] GHENAIM Sabah, SEBKHI Yasmine (simulation d'un centrale PV relie au réseau électrique par 2 logiciel PV Syst et HOMER PRO) Université de BISKRA le 2020
- [10] Mokhtari Romaissa, Tabti Zinbe Batoul ' « Intitulé du sujet Evaluation du dimensionnement de la central pv de Sidi Bel Abbés » université Mostaganem a 2022.
- [11] <https://www.jeuneafrique.com/417368/societe/lalgerie-se-lance-ambitieux-projet-de-photovoltaïque>
- [12] Revue scientifique, toutes l'information sur le photovoltaïque, p7, du 23 Aout 2012
- [13] BOUHRAOUA Asmaa Aicha, LOUCIF Rahila (Contribution à l'étude et à la conception d'une centrale hybride solaire photovoltaïque-diesel pour alimentation en énergie renouvelable) Université de Tlemcen le 2022
- [14]https://www.marne.gouv.fr/contenu/telechargement/33012/206407/file/3.4_Description_projet_Volet_commun_v202002.pdf
- [15] Mr BEN KHELIFA Mohammed ' « Etude et Conception des montages d'une forme éolienne dans un milieu saharien (centrale KABERTENE –ADRAR) » soutenu le 06 / 06/ 2015
- [16] Programme des Energies Renouvelables, CREG, Adrar, mars 2015
- [17] Draïdi abdelah, "répartition optimal des puissances, utilisant les techniques de l'intelligence artificielle" thèse doctorat, 11 juillet 2016- Université frères Mentouri- Constantine 1

Bibliographique

- [18] k.Srairi, B Tarek, et A Bensalem, "Dispatching Economique du réseau électrique algérien en Présence des dispositifs Shunt FACTS avec Considération de la pollution belkacem mahdad", Université de Biskra
- [19] A. Ould Mohamed Yahia, A. Ould Mahmoud, and I. Youm, "Modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV/éolien/diesel)," *Revue des énergies renouvelables*, pp. 205–214, 2007
- [20]. Boucif SouadChaib Djamaia « ETUDE ET EVALUATION DU POTENTIEL EOLIEN DANS LA REGION DE KSAR CHELLALA » Master université de Mostaganem 2020/2021
- [21]. Mohammed Guezgouza & all "Optimal hybrid pumped hydro-battery storage scheme for off-grid" *Energy Conversion and Management* 199 (2019) 112046 journal home page: www.elsevier.com/locate/enconman
- [22]. Benoudjit « étude pour la conception d'un banc d'essais pour énergie éolienne » : thèse de magistère de l'université de Batna, juin 2000
- [23] Mohammed Guezgouz & All "Assessment of solar and wind energy complementarity in Algeria" *Energy Conversion and Management* 238 (2021) 114170 journal homepage: www.elsevier.com/locate/enconman
- [23] S. Rehman, M. Ahmed, M. H. Mohamed et F. A. Al-Sulaiman, «Feasibility study of the grid connected 10 MW installed capacity PV power plants in Saudi Arabia,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 80 (2017) 319-329, 2017.
- [25] S.M. Boudia, 'Optimisation de l'Evaluation Temporelle du Gisement Energétique Eolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie', Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen Abou-Bakr Belkaïd, 2013.
- [26] BOUCHRA F.Z. Amrani & All "Performance Evaluation and degradation analysis of 20 MW photovoltaic power plant located in the Southwestern Highlands of Algeria" *revue internationale : Building Services Engineering Research and Technology* <onbehalfof@manuscriptcentral.com>. 2 mai 2024,
- [27] Mostefa Hanchour Aymen et Kies Mohamed Amine « Etude et Evaluation du potentiel Eolien dans la region de dhaya » master université de Mostaganem 2023
- [28] MARIH Salah ('THESE : optimisation d'un parc éolien en vue de son intégration au réseau Electrique Algérien ') de l'université de Mostaganem le 2020
- [29] Marih Salah, Leila Ghomri, and Benaissa Bekkouche. "Evaluation of the Wind Potential and Optimal Design of a Wind Farm in the Arzew Industrial Zone in Western Algeria." *International Journal of Renewable EnergyDevelopment*9,no.2 (2020).<https://doi.org/10.14710/ijred.9.2.177-187>
- [30] Mohammed, Daoudi, M. Abdelaziz, A. Sidi, E. Mohammed, and E. Elmostapha. "Wind speed data and windenergy potential using Weibull distribution in Zagora, Morocco." *International Journal of Renewable EnergyDevelopment*8,no.3(2019):267-273.<https://doi.org/10.14710/ijred.8.3.267-273>
- [31] Dahmoun Mohcen et belalem Karim « dimensionnement de la central photovoltaïque de elbyed sidi cheikh » mémoire de master soutenu à l'université de Mostaganem 2016
- [32] SULAIMAN ABUTEIR " EVALUATION AND SIZING OF THE NAAMA" mémoire de master soutenu à l'université de Mostaganem en 2023
- [33] Y. Merzouk et S.Himrid, «Potential and economic feasibility of wind energy in south West region of Algeria,» *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2020.

Bibliographique

[34] Bouhenni Imane Mehdi Fadhila '(Dimensionnement d'un système d'une centrale Solaire Hydroélectrique pour alimenter le rectorat de l'université de Mostaganem site Kharouba) Soutenu le

[35] M. SLAMA Fateh « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique » UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF- (le 01/04/2011)

[36] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07 ,2012

[37] Z.Guiassa et D.Gorine « Etude d'un projet d'un système autonome hybride photovoltaïque éolien et biomasse pour application agricoles » master université de Mostaganem 2023

[38] DAHMOUN Mouhcn El- Hadi « Evaluation des performances et la gestion de l'énergie produite par une centrale photovoltaïque réalisée au sud algérien avec l'intégration d'un system de stockage » Thèse de doctorat soutenu a l'université de mostaganem en 2023

[39] MECHALIKH Med Nadjib & HAMADA Charaf Eddine "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau" UNIVERSITÉ KASDI MERBAH – OUARGLA 2013

[40] F Benyarou « conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïque modélisation, dimensionnement et simulation » thèse de doctorat Université de Tlemcen2004

[41] Mlle ZERROUKI Zolikha , Mlle BEREKSI REGUIG Rym " Dimensionnement d'un Système photovoltaïque autonome UNIVERSITÉ ABOU-BEKR BELKAID – TLEMEN :2016 – 2017.

[42] SADAoui Elias « Gestion d'énergie dans un système hybride (Photovoltaïque - Eolien) » Master en électrotechnique Université Abderrahmane Mira – Bejaia en 2012.

