

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الدكتور مولاي الطاهر

سعيدي

Université de Saida Dr Tahar Moulay Faculté de Science et Technologie

Département d'Electrotechnique et d'Automatisme



MEMOIRE

Mémoire de fin d'étude présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Électrotechnique

Spécialité : Réseaux Électriques

Par : - BERRAHI WISSEM

- LACHELEK BRAHIM

Sujet

Optimisation Technico-économiques Des Systèmes Hybrides PV/ Wind A Energies Renouvelables

Soutenue publiquement en **17/06/2025** devant le jury composé de :

Mr. ARZEG KADDOUR	MCA	Univ. Saida	Président
Mr. AMARA MOHAMED	MCA	Univ. Saida	Rapporteur
Mr. HAFFAF AZIZ	MCA	Univ. Saida	Examinateur

Remerciements

Avant tout, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant et Le remercie pour Son aide et Son soutien dans l'accomplissement de ce travail, ainsi que pour la force et la patience qu'il m'a accordées afin d'atteindre ce succès.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude et ma sincère reconnaissance à mon encadrant, Monsieur AMARA MOHAMED pour ses orientations éclairées, ses conseils précieux, son soutien constant et sa grande patience tout au long des différentes étapes de cette recherche. Sans ses remarques constructives et ses conseils avisés, ce travail n'aurait pas atteint sa forme actuelle.

Je ne saurais oublier de remercier chaleureusement le président et les membres du jury, Monsieur ARZEG KADDOUR et Monsieur HAFFAF AZIZ pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce travail, ce qui lui a conféré une valeur scientifique et morale inestimable.

Enfin, j'adresse mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui m'ont soutenu, de près ou de loin, et qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre, à la réussite de cet effort modeste.

Dédicaces 1:

Brahim Lachelek

Je dédie ce travail

À Mon père et mes frères (Merzoug – Djillali – Mokhtar - Adel)

À ma femme et mes enfant (Sara –Salah Eddine)

À toute la famille Lachelek et tous mes amis B.Lachelek
Je dédie ce travail

À Mon père et mes frères (Merzoug – Djillali – Mokhtar - Adel)

À ma femme et mes enfant (Sara –Salah Eddine)

À toute la famille Lachelek et tous mes amis .

Brahim Lachelek

Dédicaces 2:

BERRAHI WISSEM

À ceux qui ont été la lumière sur mon chemin,
À ceux qui m'ont soutenue par leurs paroles, leurs prières et leur amour sincère,
À mes chers parents, ma mère bien-aimée et mon père respecté,
Vous êtes la source de cette réussite. Sans vous, rien n'aurait été possible.

À mes frères et sœurs, compagnons de vie et piliers de ma force,
À toute ma famille, source d'amour et de soutien constant,
À mes amis, et à tous ceux qui m'ont soutenue dans ce travail,
Je vous dédie ce travail modeste, avec toute ma gratitude et mon affection.

BERRAHI WISSEM

Résumé

Face à la demande croissante pour des sources d'énergie propres et durables, les systèmes hybrides combinant l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne se présentent comme des solutions prometteuses, capables de répondre efficacement aux besoins énergétiques tout en respectant l'environnement. L'optimisation technique et économique de ces systèmes revêt une importance capitale pour garantir une exploitation maximale des ressources renouvelables à moindre coût, renforçant ainsi leur compétitivité et leur applicabilité dans divers contextes.

Cette étude propose une analyse approfondie visant à optimiser à la fois les aspects techniques et économiques des systèmes hybrides photovoltaïque/éolien. Elle porte sur l'évaluation des performances, la conception de modèles équilibrantes exigences opérationnelles, coûts d'installation et de maintenance, ainsi que l'analyse de la rentabilité de l'énergie produite.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons utilisé le logiciel de simulation spécialisé **HOMER**, un outil puissant pour modéliser et analyser différents scénarios de systèmes hybrides. HOMER facilite l'évaluation globale des coûts et des performances techniques et économiques, permettant ainsi de prendre des décisions éclairées pour la conception de systèmes renouvelables efficaces et durables.

La recherche se concentre également sur le développement de stratégies intelligentes de gestion des ressources énergétiques renouvelables et de leur stockage, en tenant compte des variations naturelles du soleil et du vent, afin d'assurer une alimentation électrique continue et de qualité. En outre, l'étude évalue des indicateurs économiques tels que la période de récupération de l'investissement, la valeur actuelle nette et le retour sur investissement, aidant à trouver le meilleur compromis entre performance technique et coût économique.

Ce travail ambitionne de proposer des solutions intégrées qui contribueront à la diffusion accrue des systèmes hybrides, faisant d'eux une option viable et durable pour l'approvisionnement énergétique tant dans les zones urbaines que rurales.

Mots-clés : optimisation technique – analyse économique – système hybride – énergie solaire – énergie éolienne – énergies renouvelables – logiciel HOMER

Summary

In response to the growing demand for clean and sustainable energy sources, hybrid systems combining photovoltaic solar energy and wind energy emerge as promising solutions capable of effectively meeting energy needs while respecting the environment. The technical and economic optimization of these systems is of paramount importance to ensure maximum utilization of renewable resources at lower costs, thus enhancing their competitiveness and applicability in various contexts.

This study presents an in-depth analysis aimed at optimizing both the technical and economic aspects of photovoltaic/wind hybrid systems. It focuses on performance evaluation, model design that balances operational requirements, installation and maintenance costs, as well as the profitability analysis of the energy produced.

To achieve these goals, we used the specialized simulation software **HOMER**, a powerful tool for modeling and analyzing various hybrid system scenarios. HOMER facilitates comprehensive assessment of costs and technical-economic performance, thereby enabling informed decision-making in the design of efficient and sustainable renewable energy systems.

The research also emphasizes the development of intelligent strategies for managing renewable energy resources and their storage, considering natural variations in sunlight and wind to ensure continuous and quality electricity supply. Furthermore, the study evaluates economic indicators such as payback period, net present value, and return on investment, helping to find the best balance between technical performance and economic cost.

This work aims to propose integrated solutions that will contribute to the wider adoption of hybrid systems, making them a viable and sustainable option for energy supply in both urban and rural areas.

Keywords: technical optimization – economic analysis – hybrid system – solar energy – wind energy – renewable energies – HOMER software

ملخص

نظرًا للطلب المتزايد على مصادر الطاقة النظيفة والمستدامة، تُعد الأنظمة الهجينية التي تجمع بين الطاقة الشمسية الكهروضوئية والطاقة الريحية حلولاً واعدة قادرة على تلبية الاحتياجات الطاقوية بشكل فعال مع احترام البيئة. ويعُد تحسين هذه الأنظمة من الناحية التقنية والاقتصادية أمراً بالغ الأهمية لضمان استغلالٍ أمثلٍ للموارد المتتجددة بأقل تكلفة ممكنة، مما يعزز من تنافسيتها وقابليتها للتطبيق في مختلف السياقات.

تقترن هذه الدراسة تحليلًا معمقاً يهدف إلى تحسين الجوانب التقنية والاقتصادية لأنظمة الطاقة الهجينية الشمسية/الريحية، مع التركيز على تقييم الأداء، وتصميم نماذج توازن بين المتطلبات التشغيلية وتكاليف التركيب والصيانة، بالإضافة إلى تحليل الجدوى الاقتصادية للطاقة المنتجة.

لتحقيق هذه الأهداف، تم استخدام برنامج المحاكاة المتخصص **HOMER**، والذي يُعد أداة قوية لنمذجة وتحليل مختلف سيناريوهات الأنظمة الهجينية. حيث يُسهل **HOMER** التقييم الشامل للتكاليف والأداء الفني والاقتصادي، مما يساعد على اتخاذ قرارات مدرورة لتصميم أنظمة طاقوية فعالة ومستدامة. ترتكز الدراسة أيضًا على تطوير استراتيجيات ذكية لإدارة موارد الطاقة المتتجددة وتخزينها، مع الأخذ بعين الاعتبار التقلبات الطبيعية في الشمس والرياح، وذلك لضمان توفير مستمر وجودة عالية للكهرباء. بالإضافة إلى ذلك، تقييم الدراسة مؤشرات اقتصادية مثل مدة استرداد الاستثمار، والقيمة الحالية الصافية، والعائد على الاستثمار، مما يساعد في التوصل إلى أفضل توازن ممكن بين الأداء الفني والتكلفة الاقتصادية.

يُطمح هذا العمل إلى تقديم حلول متكاملة تساهم في التوسيع في استخدام الأنظمة الهجينية، وجعلها خياراً فعالاً ومستداماً لتوفير الطاقة، سواء في المناطق الحضرية أو الريفية.

الكلمات المفتاحية: التحسين التقني – التحليل الاقتصادي – النظام الهجين – الطاقة الشمسية – الطاقة الريحية – الطاقات المتتجددة – برنامج **HOMER**

Sommaire

Remerciements	I
Dédicaces 1:.....	II
Dédicaces 2:.....	III
Résumé	IV
Sommaire.....	V
Liste des figures	VV
Liste des tableaux.....	VII
Liste des acronymes et des symboles.....	VIII

INTRODUCTION GENERAL.....	1
----------------------------------	----------

Chapitre I :Generalites Sur Les Energies Renouvelables	3
I.Généralités sur les énergies renouvelables.....	4
I.1.Généralité sur les sources d'énergies renouvelables	5
I.1.1.Introduction.....	5
I.2. Types d'énergies renouvelables.....	5
I.2. 2. Energie solaire	6
I.2.3. Énergie géothermique	7
I.2.4. Énergie éolien	7
I.2.4.1 différents types d'éoliennes	8
I.2.4.1.1 éoliennes à axe horizontal	8
I.2.4.1.2 éoliennes à axe verticale	8
I.2.4.2 catégories des éoliennes selon leur puissance :	8
I.2.4.3 Fonctionnement	8
I.2.4.4 avantage et inconvénients	9
I.2.4.5 éolienne ne tournent pas tout les temps.....	9
I.2.4.6 cout d'installation des éoliennes et sa Rentabilité :	10
I.2.5. L'énergie hydroélectrique	10
I.3. L'énergie du solaire en Algérie	10
I.3.1Généralités sur le soleil	10
I.3.2 Energie solaire en Algérie.....	11
I.3.3 Électricité solaire par effet photovoltaïques	12
I.3.3.1 Historique	12
I.3.3.2 solaire photovoltaïque	12

I.3.3.3 Principe de fonctionnement	12
I.4 cellule photovoltaïque	13
I.4.1 Définition et principe.....	13
I.4.2 Différents types des cellules photovoltaïques.....	14
I.4.2.1 Cellules monocristallines	14
I.4.2.2 cellule solaire poly cristalline	15
I.4.2.3 Cellules solaires en silicium amorphe:	15
I.5. différentes configurations d'un système d'énergie hybride	16
I.5.1 Introduction.....	Error! Bookmark not defined.
I.5.2 Définition et mission des systèmes hybrides	17
I.5.3 Classification des systèmes hybrides	17
I.5.3.1 Le régime du fonctionnement	17
I.5.3.2 structure du système hybride	18
I.5.4 Configuration des SEH.....	18
A. Architecture série	18
A.1. Architecture à bus à CC :	18
A.2. Configuration à bus à courant alternatif AC.....	19
B. Architecture parallèle	20
I.5.5 Avantages et inconvénients d'un système hybride.....	20
I.6. Etude des structures des systèmes hybrides.....	21
I.6.1.Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle	21
I.6.1.1 Systèmes photovoltaïque/source conventionnelle	21
I.6.1.2 Système hybride éolien/stockage.....	24
I.6.1.3 Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage	24
I.6.2 Systèmes hybrides sans source conventionnelle.....	24
I.6.2.1 Système hybride photovoltaïque/stockage.....	24
I.6.2.2 Système hybride éolien/stockage.....	25
I.6.2.3 Système hybride photovoltaïque-éolien avec stockage.....	25
I.6.2.4Système hybride photovoltaïque-éolien sans stockage	26
I.7 .Principaux composants d'un système hybride.....	26
I.7.1. générateur photovoltaïque.....	26
I.7.2.Générateur éolien.....	26
I.7.3 batteries de stockage.....	26

I.7.4 .Convertisseurs :	27
I.7.5.Charges.....	27
Chapitre II Modélisation du système hybride.....	28
II.1 Introduction	29
II.2 Modélisation D'un Système Hybride.....	29
II.2.1 La modélisation d'une cellule solaire	30
II.2.1.1 Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque	30
II.3 Caractéristique d'une cellule solaire	31
II.4 Association des cellules	33
II.4.1 Association en série des cellules Photovoltaïques	33
II.4.2 Association parallèle des cellules Photovoltaïques.....	35
II.4.3 Association mixte série-parallèle des cellules Photovoltaïques	36
II.5 Types de systèmes Photovoltaïques.....	36
II.5.1 Système autonomes	36
II.5.2 Systeme Photovoltaïque Non Autonome	37
II.6 Avantages et les Inconvénients du photovoltaïques	37
II.6.1 Avantages du photovoltaïque	37
II.6.2 Inconvénients du photovoltaïque	38
II.7 Effet de l'éclairement et de la température sur la courbe I-V dans les systèmes photovoltaïques ..	38
II.7.1.Influence des résistances série et shunt	39
II.7.2 Influence de la température de cellule photovoltaïque	39
II.7.3 Influence de l'ensoleillement de cellule photovoltaïque	40
II.8 Modélisation d'une turbine éolienne	41
II.10.1 Modélisation de la turbine	42
II.10.2 Modèle aérodynamique (coefficient de puissance)	43
II.10.3 Modèle du multiplicateur.....	43
II.11 Modélisation d'un Générateur.....	46
II.11.1 Hypothèses de Modélisation	46
II.11.2Modèle Mathématique	46
II.11.1.1 Puissance Produite	46
II.11.1.2 Consommation de Carburant.....	46
II.11.1.2 Rendement du Générateur	47
II.11.1.3 Stratégie de Fonctionnement	47

II.12 Modélisation de système de stockage [batterie]	47
II.12.1 Modèle de la charge de la batterie	47
II.12.2 Modèle de la décharge de la batterie.....	48
II.12.3 tension de la batterie	48
II.13 Conclusion	49
Chapitre III Optimisation et simulation d'un système d'énergie hybride	50
III.1. Introduction	51
III.2. Présentation du logiciel HOMER	51
III.2.1. Définition du logiciel HOMER.....	51
III.2.2. Description d'HOMER.....	52
III.3. Source d'énergie :	52
III.3.1. Ressources En Energie Solaire A Timimoun:	52
III.3.2 Ressources En Energie Eolienne A Timimoun:.....	53
III.3.3 Prix du carburant en Algérie (\$ /L) :	54
III.4 SYSTÈME HYBRIDE :	54
III.5 Description du système de timimoun :	55
III.7 LES DONNÉES :	55
III.7.1 Charge électrique :	55
III.7.2 Entrée des données Panneau photovoltaïque :	56
III.7.3. Entrée des données de l'aérogénérateur	57
III.7.4 Entrée des données de la turbine éolienne :	58
III.7.5 Simulation d'un générateur diésel	60
III.7.5.1 Entrée des données d'un générateur diésel	60
III.7.6 Simulation du système de stockage	62
III.7.6.1 Entrée des données du système de stockage	62
III.7.6.2 Evolution de l'état de charge des batteries	63
III.7.7 Simulation du système de conversion	63
III.8 Analyse du système et simulations :	64
III.8.1 Détails des composants.....	65
III.8.2. Simulation	66
III.8.3. Système optimal.....	67
III.8.3.1 Configuration optimale du système hybride solaire éolienne générateur diesel :	67
III.8.3.2 Production d'électricité	68
III.8.3.3 Analyse environnementale :	69

CONCLUSION GENERALE	73
Conclusion générale.....	74
Référence	76
ANNEXE 1	80
RAPORT DE SIMULATION HOMER	80
Sensitivity case	80
System architecture	80
Cost summary	80
Net Present Costs.....	80
Annualized Costs.....	81
Electrical	81
PV	82
AC Wind Turbine: Fuhrländer 100	82
Generator 1	83
Battery	83
Converter	84
Emissions.....	85
ANNEXE 2	85
1. Ressource Solaire	86
2. Ressource Éolienne	86

Liste des figures

Chapitre I

Figure (I.1): Les différents types d'énergie renouvelables [18].	5
Figure (I.2): Puissance PV installée dans le monde jusqu'en 2022[19].	6
Figure(I.3): Énergie éolien [46]	7
Figure (I.4): Carte de l'ensoleillement annuel en Algérie [20].....	11
Figure(I.5):effet Photovolt ä que.	13
Figure (I.6) Cellule photovoltaïque. [11].....	13
Figure(I.7): Le principe de fonctionnement de cette cellule.	14
Figure (I.8):Différents types des cellules photovoltaïques [16]	16
Figure (I.9):système d'énergie hybride	16
Figure (I.10): Architecture à bus à CC [26].	19
Figure(I.11):Configuration à bus à courant alternatif AC	19
Figure(I.12):Architecture parallèle	20
Figure(I.13): Système hybride avec connexion en série [34].....	21
Figure(I.14): Système hybride à connexion parallèle [34].	23

Chapitre II

Figure (II.1): Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.	30
Figure(II.2) :Cellules solaire connectées en série et leur caractéristique courant-tension.	34
Figure(II.3) : Cellule solaire connectées en parallèle et leur caractéristique courant-tension.....	35
Figure(II.4):Cellules solaires connectées en série-parallèle.....	36
Figure(II.5): système Photovoltaïques autonome.....	37
Figure (II.6):Caractéristiques I–V du module PV pour différentes valeurs de température et	38
L'éclairement (type PolycrystallineNeMo54P).....	38
Figure(II.7) Influences des résistances séries et shunts	39
Figure(II.8): effet de la température sur la I-V.....	40
Figure(II.9): Effet de la température sur la P-V	40
Figure(II.10) : Effet de la l'éclairement sur la I-V	41
Figure(II.11) : Effet de la l'éclairement sur la P-V	41
Figure II.12 : Modèle mécanique simplifié de la turbine.	42
Figure II.13 : Schéma de la turbine éolienne.....	42
Figure II.14 : Evolution du C_p en fonction de l'embda	45
Figure II.15 : La puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse.	45
Figure II.16: schéma électrique équivalent de n_b éléments de batteries en séries	48

Chapitre III

Figure (III.1) : Espace de travail sous HOMER	52
Figure (III.2) : Configuration du système hybride PV / générateur.....	55
Figure (III.3) : Représentation des puissances mensuelles moyennes du PV.	57
Figure (III.4): Courbe de puissance obtenue en fonction de la vitesse du vent.	58
Figure III.5.a Variation mensuelle de la vitesse du vent et la puissance calculée par HOMER (Juin 2024).	59
Figure III.5.b. Variation mensuelle de la vitesse du vent et la puissance calculée par HOMER (Décembre 2024).....	60
Figure III.6 : Puissance journalier du GD.	61
Figure (III.7) : Puissance d'une journée du mois du juin GD /PV/BATT.	61
Figure(III.8) : Batterie Hoppecke 16 OPzS 2000 [68].	62
Figure(III.9) : batteries fonctionne en décharge et l'état de charge	63
Figure(III.10): Fonctionnement du convertisseur en mode onduleur/redresseur.....	64
Figure(III.11) : Configuration du système hybride PV /Eolienne/ générateur D.....	65
Figure(III.12) : Solution optimale du système hybride PV/éolienne /GD.....	68
Figure (III.13) : La production d'énergie au cours d'une année pour tout les system.	69
Figure (III.14) :.Emission de polluants atmosphérique.	70
Figure (III.15) : Production d'énergie pendant une journée dans mois Janvier.....	70
Figure (III.16) : Production d'énergie pendant une journée dans mois juil.	71
Figure (III.17) : Production d'énergie pendant une journée dans mois Janvier.....	71
Figure (III.18): Production d'énergie pendant une journée dans mois Juil.	71

Liste des tableaux

Tableau(I.1) : Potentiel solaire en Algérie[8].....	11
Tableau(II.1) : Les paramètres pour une batterie de plomb acide	49
Tableau(III.1) : Irradiation solaire à Timimoun.....	53
Tableau(III.2): Vitesse du vent à Timimoun	54
Tableau(III.3) : Prix du carburant. Dollar par litre (\$ / L - DZD /L).....	54
Tableau(III.4) : l'estimation des besoins énergétiques journaliers par foyers.	56
Tableau(III.5): Les données du coût du PV [65].	56
Tableau (III.6): Puissance moyenne mensuelle du PV.	57
Tableau (III.7): Les données du coût de l'aérogénérateur.	57
Tableau(III.8): Valeurs de la puissance de sortie.....	58
Tableau (III.9): Données du coût du GD.....	60
Tableau(III.10) : Coût de la batterie	62
Tableau (III.11): Les données du coût du convertisseur.....	64
Tableau (III.12): Les paramètres des différents éléments.	66
Tableau(III.13) : solution optimale système hybride d'énergie solaire éolienne générateur diesel. .	67
Tableau(III.14): Énergie annuelle produite	68
Tableau (III.15): Emission de polluants atmosphériques.	69

Liste des acronymes et des symboles

PV: photovoltaïque

SHSER: Système hybride à sources d'énergie renouvelables

SEH: Système énergétique hybride

PVE : Photovoltaïque-Eolienne

AC: Courant Alternatif (Alternating current)

DC: Courant Continu (Direct current)

CC: Courant Continu CA Courant Alternatif

R_p : la résistance shunt qui modélise les fuites par l'effet de bord autour de la cellule solaire.

R_s : contacts ohmiques entre le métal et le semi-conducteur.

I_{ph} : le courant photovoltaïque engendré par les radiations lumineuses

$J_{turbine}$: le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne.

J_g : le moment d'inertie du générateur.

f_g : Le coefficient dû aux frottements visqueux du générateur.

C_g : le couple mécanique sur l'arbre du générateur.

Ω : La vitesse de rotation du générateur.

R_s : La résistance série de la cellule [Ω].

V : La tension de cellule.

I : Le courant de cellule.

T_c : La température effective de la cellule en Kelvin [$^{\circ}\text{K}$].

q : La charge d'électron $e=1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

I_0 : Le courant de saturation [A].

K : La constante de Boltzmann $(1.3854 \times 10^{-2} \text{ J K}^{-1})$.

n : Le facteur de qualité de diode.

$C_{Bat(t)}$: La quantité de la charge de batterie au temps (t).

$C_{Bat}(t-1)$: La quantité de la décharge de batterie au temps (t-1).

σ : Est le taux horaire de la charge spontané.

P_{PV} : Est la puissance de générateur PV.

P_L : Est la charge demandée au temps t.

η_{ond} : Le rendement de l'onduleur.

η_{Bat} : Le rendement de la batterie.

V_{out} : tension de sortie (V),

I_{out} : courant de sortie (A),

INTRODUCTION GÉNÉRAL

Introduction général

La consommation d'énergie mondiale a considérablement progressé au cours des dernières années et ne va pas ralentir la croissance des consommations en fonction de la consommation de l'électricité par habitant et le principe de la croissance économique.

Actuellement, notre monde contemporain regrette l'oxydation des énergies polluantes et cherche à produire de l'électricité à partir des énergies renouvelables. Ces types d'énergies non polluantes sont la réponse pour diminuer les gaz à effet de serre. Les énergies renouvelables se sont développées comme une forme d'énergie de remplacement par leur complément de souplesse de leur facilité d'utilisation, de leur nombre de domaines d'affectation. Nous pouvons compter sur les énergies renouvelables bien non seulement ont une tertiaire de technicians performions qui produit de l'électricité sur fond perou;"/pétrolière non délectable ni pollue mais également une industrie mûre [1][2].

Il est compliqué de faire face uniquement grâce à une seule manière d'énergie, par conséquent nous nous sommes intéressés au système hybride (Photovoltaïque- Eolienne) de par leur croissance grande augmentation durant quelques années. Mais la seule production d'électricité à partir de l'une des deux sources Photovoltaïque-Eolienne (PVE), est un objectif très souvent limité par le prix du KWh produit, due à l'irrégularité du vent et à la discontinuité dans le temps du rayonnement solaire impliquant le besoin de stockage d'énergie... Ou bien c'est ce côté-là des énergies on est encore aujourd'hui l'un des facteurs qui freinent le plus lentement leur développement.

Puisque les deux ont leurs caractéristiques saisonnières respectives, ceux-ci complétera pas entre eux mais plus allié mutuelle. Cette complémentarité explique qu'on offre ici le système hybride formé de ces deux sources d'énergies PVE, pouvant s'adapter en profitant de leur optimale complémentarité.

À cette fin, nous vous proposons ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergies PVE, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles.

Dans ce contexte, l'objectif est d'Optimisation technico-économique des systèmes hybrides PV/ Wind à énergies renouvelables utilisant (Hybride Renewable Énergie Optimisation Model) « HOMER ». Cette étude permettra de comparer les performances en termes de résultats les meilleures la solution la plus appropriée et en intégrant de manière optimale l'énergie dans le réseau électrique au moindre coût et sans perte.

Le présent mémoire consiste de trois principaux chapitres en plus de l'introduction Générale et de la conclusion générale. On a analysé les Caractéristique et la modélisation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque pour alimenter d'une région isolée.

Dans le premier chapitre, des généralités sur les moyens de production et la politique l'électrification engagé dans le grand sud algérien. Nous nous intéressons aux différentes contraintes et problèmes rencontrés dans l'exploitation les centrales et réseaux isolés existantes dans les sites éloignés et isolé au grand sud.

Dans ce premier chapitre, on fait une généralité sur les énergies renouvelable (éolien, hydraulique, solaire...etc.)

Dans le second chapitre, nous présentons dans premier lieu les principaux dispositifs et composantes utilisées dans les systèmes hybrides, notamment les photovoltaïques. Apres avoir justifié l'intérêt de source photovoltaïque pour les systèmes hybrides.

Dans le troisième chapitre, nous allons étudier les méthodes d'hybridation d'une centrale diésel en énergie photovoltaïques et leurs applications. Les simulations sous HOMER nous permettent de valider et choisir le modèle le plus fiable, rentable et optimisé.

Nous avons ensuite déterminé la taille du système hybride composé de systèmes de conversion d'énergie renouvelable, d'énergie solaire, d'énergie éolienne conventionnelle (générateur diesel) et d'un système de stockage afin de fournir une charge électrique basse tension à un village isolé près de la province de Tindouf en utilisant le logiciel de simulation HOMER, et la détermination a été faite. Une analyse économique et une comparaison de différentes structures de systèmes ont été réalisées. Nous avons ainsi démontré l'avantage bénéfique du système hybride par rapport au système électrique conventionnel destiné à alimenter en électricité les zones rurales isolées ainsi que le système de stockage, indispensable dans ce type de système de production d'électricité.

Enfin, nous exposons l'ensemble des résultats obtenus numériquement que nous Interprétons. À partir des résultats obtenus, Nous clôturons cette étude par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les énergies renouvelables

I.1.Généralité sur les sources d'énergies renouvelables

I.1.1.Introduction

Le monde aujourd'hui connu une transformation fondamentale du domaine des systèmes de production de l'électricité, qui est la dérégulation du marché de l'électricité. Les raisons de cette dérégulation sont variées et multiples selon les pays. Cependant une de ces conséquences est l'apparition de nouveaux moyens de production nommés les énergies renouvelables au sein des réseaux électriques existants.

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie inépuisable, disponibles à volonté, diverses et variées.

Grâce à ces énergies peu polluantes, on peut envisager un système de production énergétique prolifique qui possède de nombreux avantages. Elles sont plus propres, plus respectueuses de la nature que les énergies fossiles et fissiles, écologiques, disponibles en masse autour du globe et sont gratuites une fois les installations de production rentabilisées [3].



Figure (I.1): différent type d'énergie renouvelable [18].

I.2. Types d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont diverses et variées, allant du solaire à l'éolien, géothermie, biomasse et hydroélectrique.

I.2.1. Energie biomasse

La biomasse désigne la part biodégradable des produits, déchets et résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture, de l'élevage, de la pêche, de l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels, domestiques et assimilés (E.E.D.D.I.).

La biomasse est principalement utilisée de la manière suivante:

- ✓ En utilisant la fermentation des déchets sur conditionnement, le gaz méthane peut être capté et rendu apte à l'utilisation comme source d'énergie,
- ✓ La matière organique également une peut être incinérée.

Dans les deux cas, la demande thermique d'une instance puisse être reversée à hydraulique, celle-ci générera de l'électricité dans des centrales thermo-électriques-triques. Le intérêt est qu'il se retrouve le dioxyde de carbone injecté dans l'environnement au cours de l'incinération de l'agriculture, ou le méthane est compensé par celui capté par l'agriculture. Éloigne les plantes qui à plus forte raison sont la plus importante source de biomasse. De cette manière, le bilan carbone peut être quasi nul [4].

I.2. 2. Energie solaire

L'énergie solaire, elle est une énergie renouvelable qui est générée en convertissant la lumière du soleil en énergie électrique ou thermique. L'eau des potasses est employée comme ressource pour le dessalement de l'eau, la production d'eau chaude conventionnel et la sélection d'électricité. L'énergie solaire est une source d'énergie propre et tant... Tant que c'est très propre... Elle a de nombreux avantages parmi lesquels sont à relever des coûts d'exploitation économiques limités, des émissions de gaz à effet de serre minimalisées, Pourtant, il y a en revanche, quelques inconvénients comme les coûts mis ensemble sont assez grands. L'énergie solaire peut fonctionner dans les territoires des régions isolées et sans infrastructures énergétiques. Elle est prometteuse d'énergie pour l'avenir, Cependant, aujourd'hui la forme de conversion de l'énergie solaire en électricité la plus fréquente reste le photovoltaïque. L'évolution de la puissance PV installée dans le monde est présentée sur la Figure(I.2).

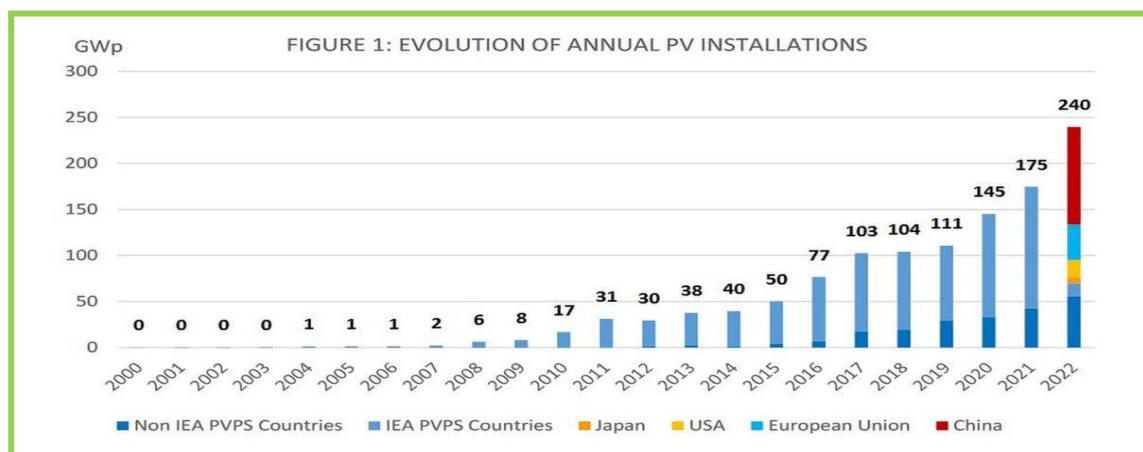


Figure (I.2): Puissance PV installée dans le monde jusqu'en 2022[19].

Aujourd’hui elle est déjà proche de 70 GW. Comme dans la filière éolienne, l’Europe tient la partie majeure de la puissance installée mondialement.[4et5]

I.2.3. Énergie géothermique

La géothermie est la chaleur engagée au sein du sol. Les principales activités entreprises en France, en géothermie profonde (plus de 2000 m), sur les démonstrations autour du chauffage de logements collectifs par réseaux de chaleur dans le bassin parisien et en Aquitaine de 1982 et 1986. Elles favorisent une économie de 0,17 M tep/an. Cette filière est relativement peu développée en France. Une autre technique autre est proposée sous le nom de géothermie de surface. Il s’agit d’une méthode d’extraction au système pompe extraction chaleur. Son principe est le suivant. Un capteur prélève de la chaleur du sol en extérieur, par exemple sous une pelouse. Son origine provient aussi bien du rayonnement solaire. Cette chaleur est acheminée dans la maison le plus souvent par un plancher chauffant. Dans tous les cas, le transfert thermique nécessite un fluide frigorigène et un appoint électrique de compression (environ 1/3 des besoins en énergie de chaleur) [6].

I.2.4. Énergie éolien

Parmi toutes les renouvelables qui entrent dans la production d’électricité, c’est pour l’instant la du vent qui fait le show. Elle s’avère être l’une des plus incroyables, à l’eco, en matière de compétitivité, de domaine d’application et de création d’emplois et de richesses. Son potentiel est titanique, il est évalué à 30.1015 kWh au niveau mondial et à 5.5012 - 50.1012 kWh/an pour la seule part exploitables terrestres. En France, on estime les ressources éoliennes exploitables par an à environ 70.109 kWh terrestres et de 500.109 kWh en offshore soit plus que l’apport de l’énergie éolien (400.109 kWh) provenant des centrales de production d’électricité [MUL 99]. Ces Ressources traduites en Rapide de Vent sont données sur la Figure ci dessus. Bien sûr les variations passagères difficilement prévisibles de la production éolienne créent des problèmes difficiles à stabiliser pour les réseaux dans lesquels la mise en stockage d’énergie risque de devenir indispensable [6].



Figure(I.3): Énergie éolien [46]

I.2.4.1 différent type d'éolienne [40]

La taille des éoliennes varie largement, et la longueur des pales reste le facteur déterminant principal de leur capacité de production. Les petites éoliennes domestiques peuvent générer jusqu'à 10 kilowatts (kW), suffisants pour alimenter une maison. En revanche, les plus grandes éoliennes actuellement en service peuvent atteindre une puissance de 10 mégawatts (MW), soit 10 000 kW, et les recherches récentes développent déjà des prototypes allant jusqu'à 15 voire 20 MW pour une production à grande échelle, notamment en mer (offshore).

Les deux types d'éoliennes de base :

I.2.4.1.1 Eolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal, également raccourcies en HAWT, sont le style commun auquel la plupart d'entre nous pensent quand nous pensons à une éolienne. Les turbines à axe horizontal ont des pales comme les hélices d'avion, et elles ont généralement trois pales.

Les éoliennes à axe horizontal ont l'arbre du rotor principal et le générateur électrique au sommet d'une tour, et elles doivent être orienté vers le vent. Les petites turbines sont orientées par une simple girouette placée à l'équerre avec le rotor (les pales), tandis que les grandes turbines utilisent généralement un capteur de vent couplé à un servomoteur pour faire tourner la turbine dans le vent.

I.2.4.1.2 Eolienne à axe verticale

Les turbines à axe vertical ont des pales qui sont fixées au sommet et au bas d'un rotor vertical.

L'éolienne verticale Darrieux, du nom de l'ingénieur français Georges Darrieus qui en a fait breveter la conception en 1931, ressemble à un batteur à œufs géant à deux pales. Certaines versions de l'éolienne à axe vertical font 30 mètres de haut et 15 mètres de large. Très peu d'éoliennes à axe vertical sont utilisées aujourd'hui car elles ne sont pas aussi performantes que les éoliennes à axe horizontal.

Il est difficile de monter des turbines à axe vertical sur des tours, ce qui signifie qu'elles sont souvent installées plus près de la base sur laquelle elles reposent, comme le sol ou le toit d'un bâtiment.

I.2.4.2 Catégories des éoliennes selon leur puissance :

I.2.4.3 Fonctionnement [41]

A. Rotation des pales

Sous l'effet du vent, le rotor, se met en marche. Ses pales tournent, Le rotor est situé au bout d'un mât car les vents soufflent plus fort en hauteur. Suivant le type d'éoliennes, le mât varie entre 10 et 100 m de haut.

B. Production d'électricité

Pour pouvoir démarrer, une éolienne nécessite une vitesse de vent minimale d'environ 15 km/h.

Pour des questions de sécurité, l'éolienne s'arrête automatiquement de fonctionner lorsque le vent dépasse 90 km/h. Le rotor entraîne un axe dans la nacelle, appelé arbre, relié à un alternateur.

Grâce à l'énergie fournie par la rotation de l'axe, l'alternateur produit un courant électrique alternatif.

C. L'adaptation de la tension

Un transformateur situé à l'intérieur du mât élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne tension du réseau.

I.2.4.4 Avantage et inconvénient

Les avantages sont nombreux. L'énergie éolienne est une énergie propre, renouvelable, qui ne produit aucun déchet et ne pollue pas. On peut obtenir une production d'énergie régulière et continue si le parc éolien est situé dans un lieu adéquat et suffisamment exposé aux vents. La durée de vie des éoliennes est d'environ 25 ans mais, à la différence des centrales géothermiques, elles se démontent et sont recyclées plus facilement.

Autre avantage de l'énergie éolienne : la matière première (le vent) est gratuite. Néanmoins, il y a aussi des inconvénients non négligeables qu'il convient de citer : le coût des pales étant élevé, une longue période est donc nécessaire pour assurer le retour sur l'investissement. Notons aussi que la présence des éoliennes sur les zones côtières (généralement les plus exposées au vent) entraîne un impact peuesthétique sur le paysage et que le bruit qu'elles produisent peut se révéler gênant. Ces inconvénients peuvent néanmoins être minimisés en installant les éoliennes à quelques km de la côte, comme cela a été fait au Danemark, de manière à supprimer la gêne visuelle et acoustique [42].

I.2.4.5 Eolienne ne tournent pas tout les temps

Les éoliennes dépendent du vent et de son intensité.... Celles qui sont situées près d'obstacles comme des arbres ne vont pas démarrer tout de suite, elles devront attendre de recevoir plus de vent. Ainsi, il est tout à fait normal de ne pas voir tourner toutes les éoliennes d'un champ en même temps. De nombreux critères sont à prendre en compte : la forme du parc, l'orientation du vent, la puissance du vent... Si certaines éoliennes ne tournent pas, ce n'est donc pas parce qu'elles dysfonctionnent, c'est que le moment n'est pas encore venu ! Comme vous l'aurez compris, les éoliennes sont comme leurs ancêtres les moulins à vent, elles fonctionnent grâce à la formidable puissance du vent. Lorsqu'il y a des mouvements d'air, les éoliennes s'enclenchent pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en électricité...

Mais, car il y a un bien un mais, dans certains cas, les éoliennes ne tournent pas. Pourquoi ? Tout simplement car la puissance du vent est parfois trop faible ou trop forte et que les éoliennes ne peuvent pas tourner ! Le vent est variable, il n'est pas toujours distribué de façon continue et les installations sont sensibles et doivent parfois se protéger face à un vent trop violent... Voilà pourquoi les éoliennes ne tournent pas toujours ! Cependant, les évolutions technologiques et l'implication des chercheurs devraient permettre de créer des éoliennes capables de mieux s'adapter dans le futur et de recevoir l'énergie du vent dans toutes les situations [43].

Et comme une solution Les parcs éoliens en mer permettent de bénéficier de meilleures conditions de vent et d'un espace sans obstacle. L'installation et l'entretien sont toutefois plus

Complexes et coûteux. Il s'agit donc de projets ambitieux dotés d'éoliennes plus grandes et puissantes que leurs cousins terrestres. [44]

I.2.4.6 Le cout d'installation des éoliennes et sa Rentabilité :

Il faut environ de 10 à 15 ans pour rentabiliser une éolienne. Les coûts de revient varient énormément en fonction du modèle d'éolienne domestique, de sa puissance et de sa taille, mais aussi des travaux d'ancre nécessaires. La fourchette de prix s'étend de 4 000 €, pour l'installation d'une éolienne à environ 12 000 €, pour l'installation d'une éolienne d'une puissance nominale de 3 kW. Le panier moyen s'échelonne entre 6 000 € et 10 000 €. Une éolienne permet de produire gratuitement de l'électricité pour sa consommation personnelle. Cela n'est pas négligeable compte tenu du prix du kWh vendu par EDF. Au final, il faut en moyenne compter 10 ans pour rentabiliser l'installation d'une éolienne, sachant que les modèles de dernière génération ont une durée de vie d'environ 30 ans [45].

I.2.5. L'énergie hydroélectrique

L'énergie hydroélectrique est une énergie qui représente l'utilisation de l'énergie hydraulique pour produire de l'électricité, grâce à une turbine hydroélectrique. Elle transforme l'énergie mécanique de l'eau en mouvement (courant d'eau, débit d'eau) en énergie électrique. Elle produit donc de l'énergie électrique de manière renouvelable et quasi exempte de gaz à effet de serre. Cependant, ce n'est pas vraiment une énergie renouvelable sans impact environnemental, car elle est souvent liée à la construction d'un barrage, qui constitue un obstacle à la circulation des espèces, des sédiments et des bateaux [4].

I.3. L'énergie du solaire en Algérie

I.3.1 Généralités sur le soleil

Le Soleil est une grosse boule de gaz chaud tournant sur elle-même en 28 jours environ. Comme toutes les étoiles, le Soleil brille car il produit de l'énergie. C'est un gigantesque réacteur nucléaire. En son cœur, la température est de 15 millions de degrés. A cette température ont lieu des réactions de fusion au cours desquelles, l'hydrogène est transformé en hélium en libérant de l'énergie. Cette transformation se fait progressivement et lorsque le Soleil aura épuisé tout son hydrogène, la température en son centre augmentera encore jusqu'à déclencher la fusion de l'hélium

en carbone. Mais la capacité de fusion nucléaire dont dispose le Soleil est limitée et n'excèdera pas dix milliards d'années environ au total. [7].

I.3.2 Energie solaire en Algérie

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2500 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m² /an au Nord et 2263 kWh/m² /an au Sud du pays [8].

Tableau (I.1) : Potentiel solaire en Algérie[8].

Regions	Regions Côtieres	Hauts plateaux	Sahara
Superficies (%)	4	10	86
Durée moyenned'ensoleillement (heures/an)	2560	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et au Sahara, (Figure (I.4)). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m² /an au Nord et 2263 kWh/m² /an au Sud du pays [21].

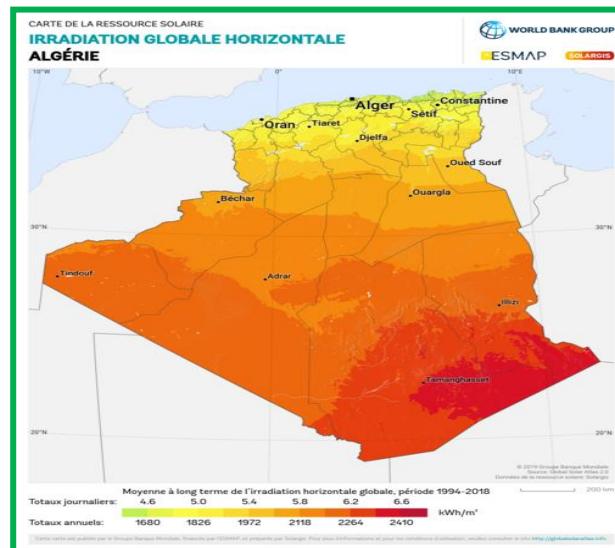


Figure (I.4): Carte de l'ensoleillement annuel en Algérie [20].

I.3.3 Électricité solaire par effet photovoltaïques

I.3.3.1 Historique

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par un physicien français, Antoine Becquerel. En 1921, Albert Einstein explique l'effet photoélectrique à la base du photovoltaïque, travaux qui lui valent le prix Nobel de physique la même année. Les années 1960 voient les premières applications industrielles de l'énergie photovoltaïque, plus précisément dans l'aérospatiale. La NASA équipe ainsi ses premiers satellites de panneaux solaires pour les alimenter en électricité. Les premières installations photovoltaïques terrestres voient le jour dans les années 1970. La première centrale résidentielle est construite en 1973 aux États-Unis, dans le Delaware. Aujourd'hui, le photovoltaïque est partout, avec une augmentation constante des capacités installées. Entre 2007 et 2012, la capacité mondiale a ainsi été multipliée par dix.

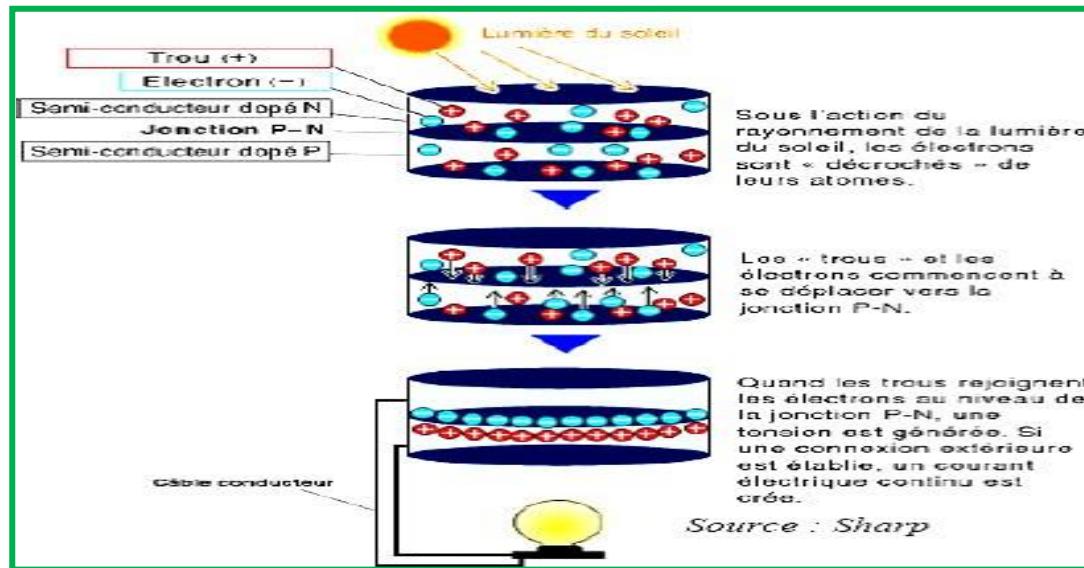
I.3.3.2 Le solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est obtenue par l'énergie des rayonnements du soleil. Plus précisément, le principe est de transformer l'énergie portée par les photons dans la lumière, en électricité. C'est la raison pour laquelle les panneaux photovoltaïques qui vont les récolter, se trouvent souvent installés sur les toits, avec la meilleure orientation possible.

C'est là que rentre en jeu la cellule photovoltaïque. Fabriquée en silicium, lorsqu'elle est exposée à la lumière, elle absorbe l'énergie des photons lumineux. Ces derniers génèrent un courant électrique continu qui sera converti en courant alternatif à l'aide d'un onduleur. Cette électricité produite peut être immédiatement employée pour faire fonctionner vos appareils ou vous éclairer [9].

I.3.3.3 Principe de fonctionnement

L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français BECQUEREL dès 1839, l'effet photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires (photon) en électricité (Volt), par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès de délectrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p [12].



Figure(I.5):effet Photovoltaïque.

I.4 Cellule photovoltaïque

I.4.1 Définition et principe

La cellule photovoltaïque est un semi-conducteur convertissant l'éclairement incident en puissance électrique. Elle est constituée d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique.

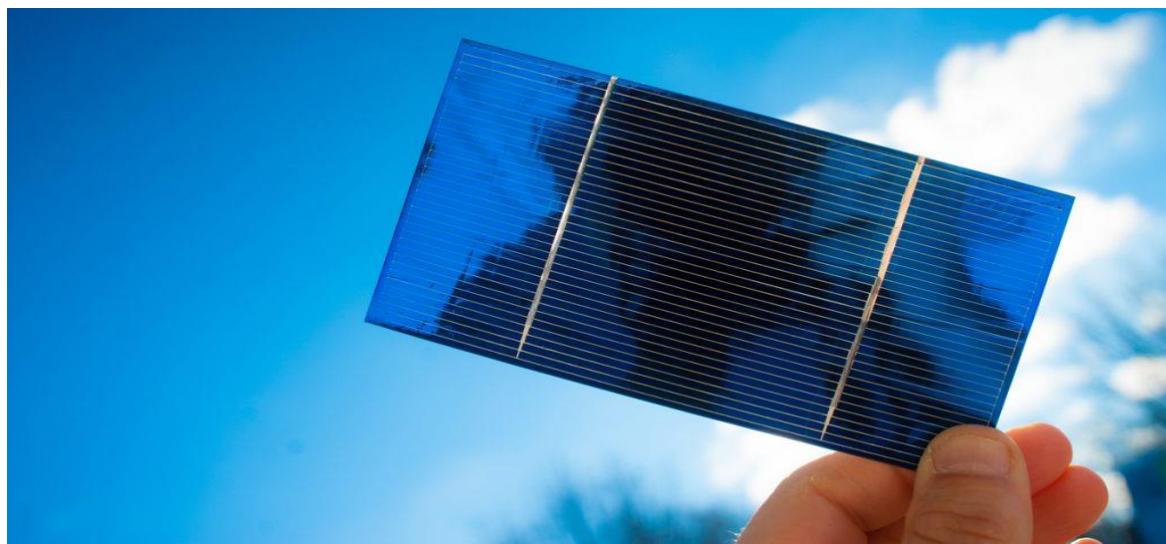


Figure (I.6) Cellule photovoltaïque. [11]

Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Ainsi, le choix des matériaux utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains de leurs électrons susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde. Une fois libérés, ces charges se déplacent dans le matériau formant globalement un courant électrique de nature continue (DC). La circulation de ce courant donne alors naissance à une force

Électromotrice (FEM) aux bornes du semi-conducteur, correspondant ainsi au phénomène physique appelé effet photovoltaïque.[10]

Cet effet est obtenu grâce à la présence de deux couches

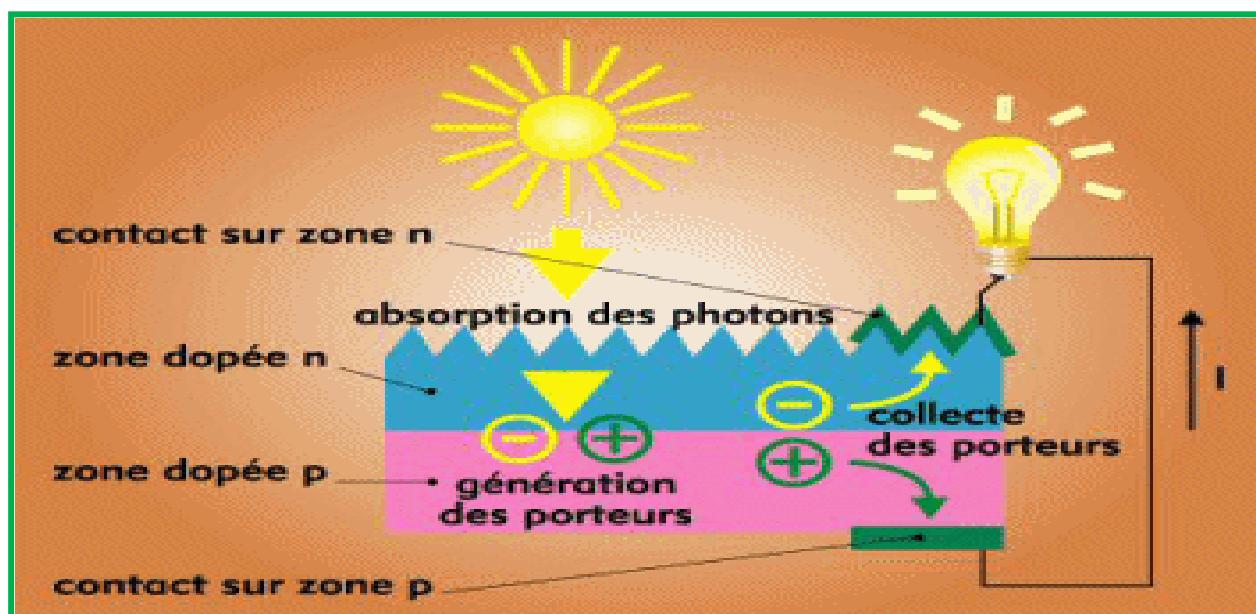
- ✓ Une couche possédant un déficit en électrons (zone P).
- ✓ Une couche possédant un excès d'électrons (zone N).

Lorsqu'un photon arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques.

C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque.

Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N.

Une tension est ainsi créée.[13]



Figure(I.7): principe de fonctionnement de cette cellule.

I.4.2 Différents types des cellules photovoltaïques

I.4.2.1 Cellules monocristallines

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal (Figure I.8). Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly-cristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage

et création de la jonction P-N, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le Wafer devient cellule. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 15 à 22 %, mais la méthode de production est laborieuse [12].

✓ A vantages

Meilleur rendement que le poly cristallin (environ 150 Wc/m²)

Durée de vie importante (+/- 30 ans)

✓ Inconvénient

Plus Cher que le poly cristallin

Rendement faible sous un faible éclairement

I.4.2.2 Cellule solaire poly cristalline

Est un type de cellule solaire fabriquée à partir de plusieurs cristaux de silicium, caractérisée par son aspect reconnaissable de grille bleu foncé. Elle offre des performances élevées et des prix plus bas que les cellules monocristallines, avec des valeurs d'efficacité moyennes de 12 à 16 %. Elle est également très résistante aux intempéries, ce qui lui confère une longue durée de vie de 25 à 30 ans. Cependant, son aspect de surface irrégulier peut être un inconvénient pour certains utilisateurs qui attachent de l'importance à l'esthétique.[15]

✓ A vantages:

- Bon rendement (environ 100 Wc/m²)
- Durée de vie importante (+/- 30 ans)
- Moins Cher que le monocristallin

✓ Inconvénient :

- Rendement faible sous un faible éclairement.[17]

I.4.2.3 Cellules solaires en silicium amorphe:

Les cellules solaires à couche mince en silicium amorphe sont traditionnellement utilisées pour des applications à petite échelle, comme les calculatrices de poche, les lampes de voyage et le matériel de camping utilisé dans des endroits reculés. Un nouveau procédé appelé « empilage », qui consiste à créer plusieurs couches de cellules en silicium amorphe, a permis d'obtenir des taux d'efficacité plus élevés (jusqu'à 8 %) pour ces technologies, mais il reste assez coûteux.[16]

✓ A vantages :

- Fonctionnent avec un éclairement faible
- Bon marché par rapport aux autres types de cellules
- Moins sensible aux températures élevées
- Souple

✓ Inconvénient :

- Rendement faible en plein soleil (environ 60 Wc/m²), les cellules en couche mince nécessite une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses
- Durée de vie courte (+/- 10 ans), performances qui diminuent sensiblement avec le temps.[17]

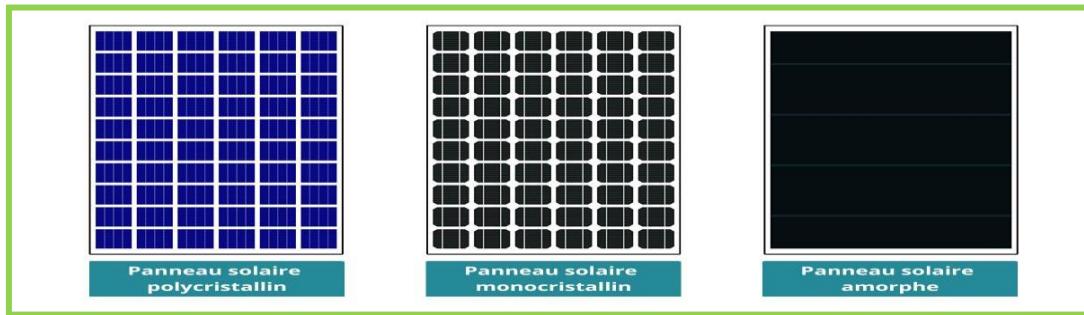


Figure (I.8): Différents types des cellules photovoltaïques [16]

I.5. Différentes configuration d'un système d'énergie hybride

Aujourd'hui, un besoin essentiel Planétaire en vue de tous les horizons, l'électricité. Développement économique. C'est la relative importance qui augmente de la même façon avec les différentes techniques. Et le besoin d'un confort moderne. L'accroissement de l'exportation est synonyme de développement de la qualité de vie et de richesse. Cependant, les combustibles fossiles représentent maintenant la quasi-totalité de cette production, mais devant. L'épuisement de cette ressource énergétique les problèmes aux problématiques. L'augmentation énorme des besoins en énergie, la quête de nouvelles réserves. L'énergétique est l'une des finalités de la politique la plus énergétiques de plusieurs pays. Les énergies renouvelables pour l'écologie. Leur exploitation permettrait de desservir partout ... et même dans les lieux reculés et encore sans électricité ... qu'il pourra désormais être rallié. Conception de nouvelles lignes électriques. Les sources d'énergie renouvelable (SER) ont vu chuter le prix d'achat. Facilitant ainsi leur emploi dans ces régions très intéressant, par rapport aux sources conventionnelles. La variabilité des sources intermittentes est l'une des limites de développement et d'utilisation des Données sur les sources d'énergie renouvelables (SER). La fluctuation ressentie par les ressources (soleil, vent, etc.) n'est pas conditionnée par la demande de charge. Pour cela pour cela il a toujours intérêt les combiner un peu. Destinées à différentes sources former un ce qu'on appelle système hybride.

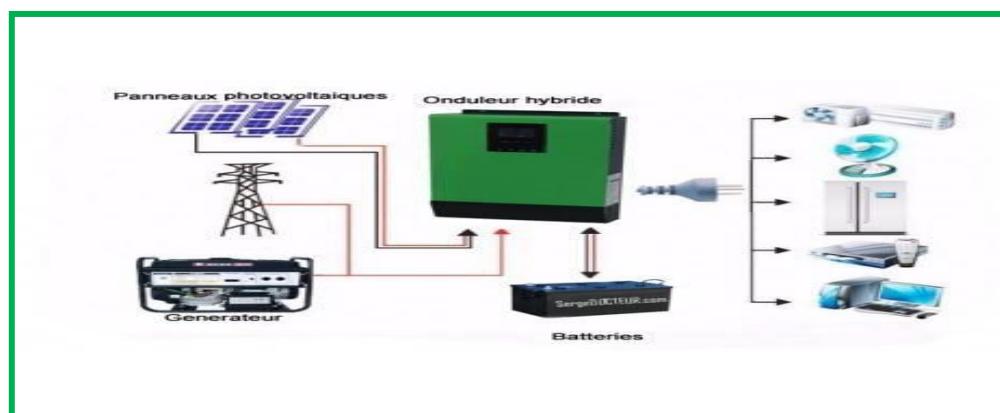


Figure (I.9):système d'énergie hybride

I.5.2 Définition et mission des systèmes hybrides

Un système de production électrique qui associe plus d'une source d'énergie de nature différente est appelé un système hybride. Ces systèmes assemblent au moins une source d'énergie renouvelable ainsi qu'une ou plusieurs sources d'énergie conventionnelles [21], [22]. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement utilisés dans les régions.

L'OBJECTIF PRINCIPAL de ces systèmes est de délivrer une énergie continue, ceci à cause de l'intermittence de plusieurs sources. Et produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie présentes pour satisfaire à une demande qui est prédictive avant la conception de ces systèmes.

Les performances d'un SEH, le rendement et la durée de vie, sont influencés en partie par sa conception et même le choix de la stratégie de fonctionnement de système hybride peut aussi influencer l'image complète du système. D'autres paramètres permettent d'évaluer les performances comme [23]:

- ✓ Coût du kW
- ✓ Nombre et la durée des pannes
- ✓ Nombre d'arrêts pour l'entretien
- ✓ Economie de carburant
- ✓ Durée de vie normale des composants individuels
- ✓ Etc

Dans l'un de leurs travaux, Museli et al. ont suggéré que la configuration optimale des systèmes hybrides, devrait être déterminée en minimisant le coût du kilowatt heure. Ashok a développé pour sa part, un modèle de système fiable, basé sur un modèle d'optimisation hybride, pour la production d'électricité renouvelable, appelé HOMER (Hybrid Optimisation Model for Electric Renewables) [23].

I.5.3 Classification des systèmes hybrides

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Dans la suite sont présentées les classifications les plus répandues.

I.5.3.1 Régime du fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés au réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc... [25].

I.5.3.2 Structure du système hybride

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système. Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet – une centrale tout entière. Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc ... La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie

hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle etc. Une généralisation de la classification présentée est illustrée sur la Figure (I.10) [25].

I.5.4 Configuration des SEH

Les générateurs électriques d'un SEH peuvent être connectés en différentes configurations. Trois configurations s'imposent parmi les systèmes d'énergie hybrides constitués par des sources d'énergie renouvelable, des batteries et des générateurs diesels : architecture à bus CC, architecture à bus AC et architecture mixte à bus CC-AC

A. Architecture série

On rencontre trois types d'architectures, Il existe différentes structures pour un système hybride, nous considérons dans ce travail un système composé d'un générateur photovoltaïque, d'une éolienne et de batteries de stockage

A.1. Architecture à bus à CC :

Un système hybride avec un bus CC (bus continu) est un système dont les différentes parties (sources d'énergies, système de stockage et charges) sont connectées à un bus CC commun. Lorsque les sources d'énergies sont de nature continue (les panneaux PVs, par exemple), elles sont reliées au bus continu directement ou bien par l'intermédiaire d'un convertisseur CC/CC (hacheur). Lorsque les sources de production sont à courant alternatif (CA), telles que les éoliennes, les générateurs diesels, etc., des convertisseurs CA/CC (redresseurs) sont installés entre ces sources et le bus continu. Cette configuration est adaptée pour des utilisations fonctionnant à CC, comme la recharge des batteries par exemple. Néanmoins, le système peut alimenter des charges CA ou être relié au réseau de distribution via des convertisseurs CC/CA (onduleurs) [31], [27]. La figure(I.10) montre l'exemple d'un système hybride avec un bus CC commun. L'ensemble des sources et des charges (charges 11 Systèmes hybrides et introduction à la technique neuronale ADALINE CC ou charges CA) que comporte le système est relié à un bus CC. Des convertisseurs CC/CA et CA/CC unidirectionnels et bidirectionnels sont utilisés pour assurer les échanges d'énergies dans le système. Les convertisseurs bidirectionnels sont généralement utilisés pour connecter les éléments du système qui sont à la fois générateurs et récepteurs d'énergie (éléments de stockage, réseau de distribution, etc.).

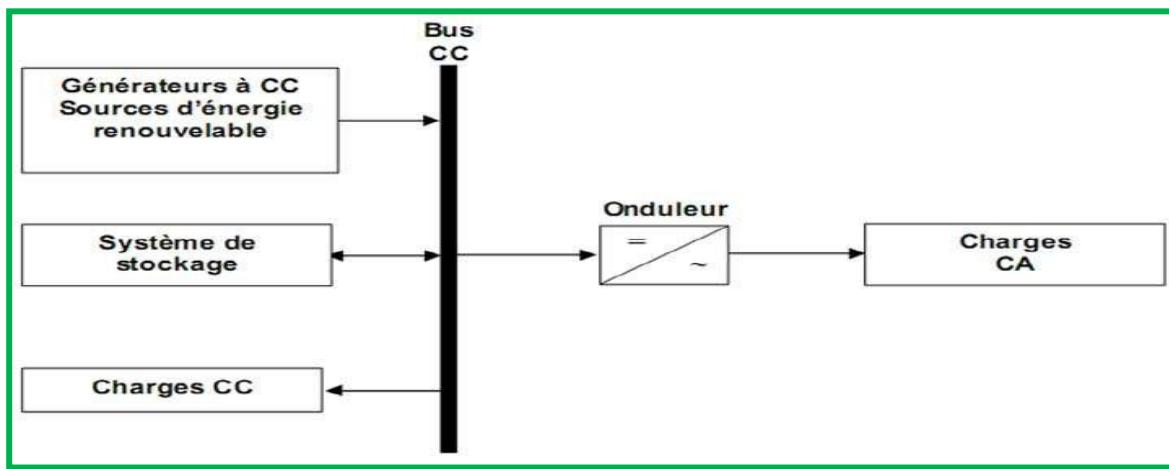
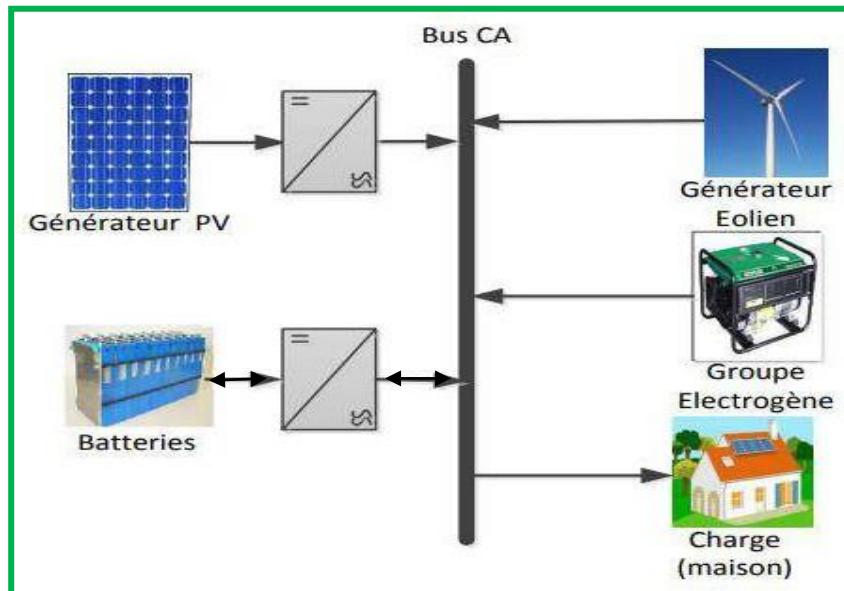


Figure (I.10): Architecture à bus à CC [26].

A.2. Configuration à bus à courant alternatif AC

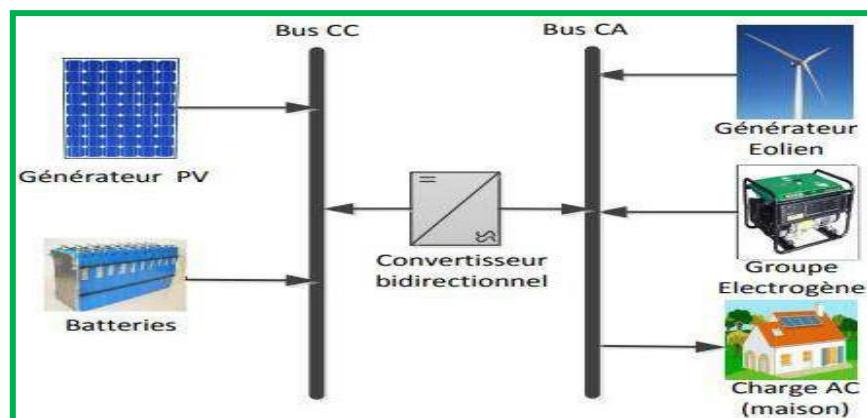
Cette structure contient un vecteur AC afin que toutes les unités du système hybride y soient connectées, et c'est un bon choix en raison de son abondance de tension alternative continue et continue, en plus de l'émergence de transformateurs plus efficaces. Dès qu'il y a une coupure de courant dans le bus, il démarre automatiquement le groupe électrogène, mais son seul point négatif est la difficulté d'imposer la fréquence et l'amplitude de la tension du bus [28].



Figure(I.11):Configuration à bus à courant alternatif AC

A-Architecture parallèle

La configuration parallèle utilise deux bus : un bus CC où sont connectées les sources à courant continu (batterie et panneaux PV), et un bus CA sur lequel sont connectés l'éolienne, le groupe diesel et la charge (maison). Les deux bus sont reliés à l'aide d'un convertisseur bidirectionnel. Le convertisseur bidirectionnel travaille soit en mode redresseur lorsque le générateur diesel couvre complètement la demande de la charge et participe à charger la batterie, soit en mode onduleur lorsque la charge est alimentée par les panneaux et/ou les batteries. De cette façon, la charge peut être alimentée par les deux bus simultanément [29]. L'architecture d'un tel système est représentée par la figure (I.12).



Figure(I.12):Architecture parallèle

I.5.5 Avantages et inconvénients d'un système hybride



Avantages

- Capable de satisfaire des charges évolutives
- Exploitation simple, travaux de maintenance et révision réduits.
- Non dépendant d'une seule source d'énergie [30].



Inconvénients

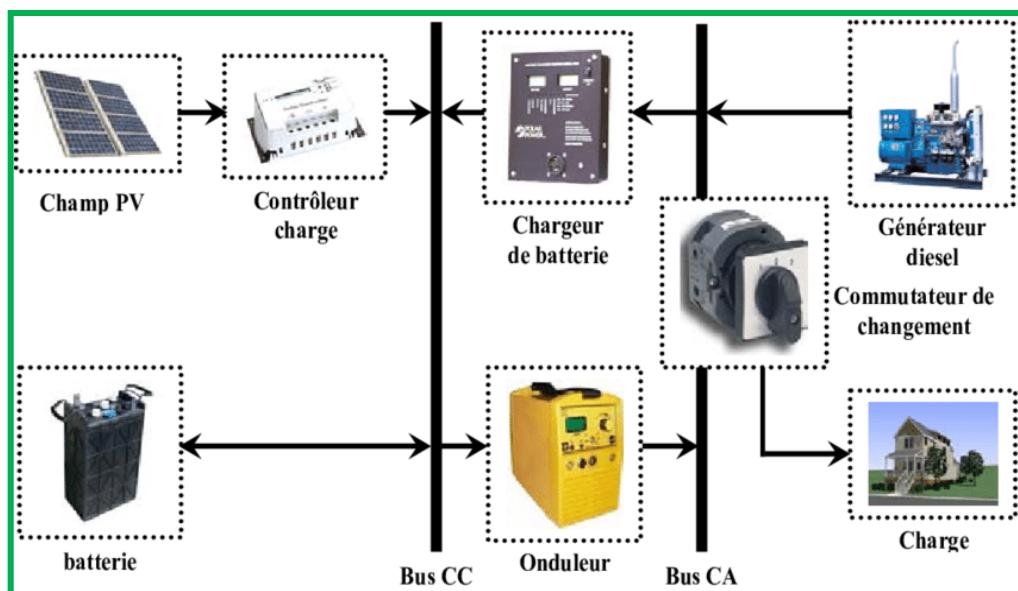
- Coût de capital élevé.
- Plus complexe que les systèmes électriques isolés; nécessite le stockage par batterie et le conditionnement de l'électricité [30].

I.6. Etude des structures des systèmes hybrides

I.6.1. Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle

I.6.1.1 Systèmes photovoltaïque/source conventionnelle

Ce type de système hybride est utilisé le plus souvent dans des sites qui se caractérisent par un climat chaud comme par exemple l'Arabie saoudite, Timimoun, le Maroc, les Maldives, la Corse etc., où le potentiel solaire est important. L'objectif de ces systèmes lorsqu'ils travaillent en mode autonome, est d'alimenter sans interruption une maison, un bâtiment de logements ou administratif ou un village.



Figure(I.13): Système hybride avec connexion en série [34].

1- Un dimensionnement simple du générateur diesel: Un schéma électrique simplifié à cause de l'absence de commutation des sources de courants alternatifs; le démarrage du Générateur Diesel n'est pas lié à une coupure de l'alimentation électrique ; Avec l'onduleur consommateur on peut alimenter avec une tension, dont le signal de forme, la valeur et la fréquence sont appropriés [32].

Les inconvénients

- L'onduleur ne peut pas fonctionner en parallèle avec le courant alternatif génératrice. C'est pour quoi il doit être dimensionné pour assurer la prise en charge de la charge maximale possible
- La batterie doit avoir une grande capacité.
- Un faible rendement du générateur diesel en courant alternatif, puisque la puissance fournie est transformée deux fois avant d'être au consommateur,

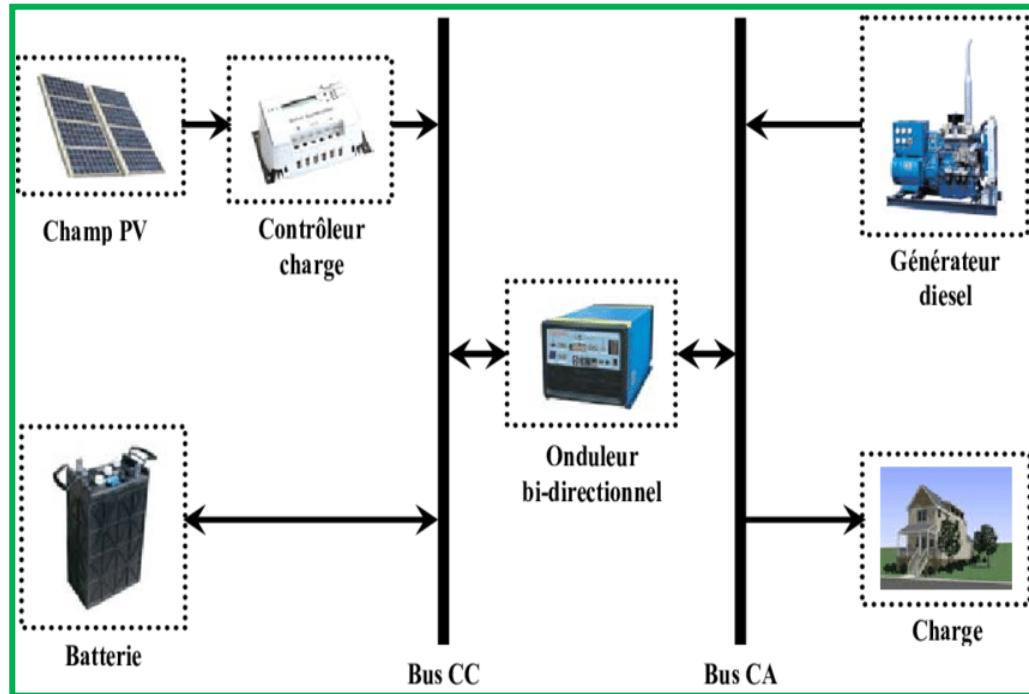
- Une panne possible de l'onduleur pourrait détruire l'alimentation électrique en une seule fois.
- 2- La deuxième configuration possible est la commutation. Elle est fréquemment mal utilisée bien qu'elle soit reconnue pour ses avantages.

Désavantage:

- Le consommateur peut être alimenté soit par la source classique, soit par l'appareil disposant d'une alimentation en énergie provenant de la source conventionnel.
 - Photovoltaïque et pile recharge via l'onduleur. Il n'est pas possible Sortir les deux sans recevoir la dernière.
 - Le groupe diesel peut charger la batterie par médiation d'un redresseur.
- La gestion du système doit être automatique à cause de la complexité du système hybride.

Le schéma du système est présenté sur la Figure (I.13) Les avantages de cette configuration sont : Le système possède un rendement plus haut, parce que le générateur diesel peut alimenter directement la charge, d'où une baisse de la consommation de fuel ; L'onduleur peut assurer au consommateur la tension demandée en forme et valeur ; Une avarie de l'onduleur n'engendrera pas l'arrêt complet de l'alimentation électrique, parce que la charge peut être satisfaite par le générateur diesel. Les inconvénients sont :

- L'apparition d'une coupure instantanée de l'alimentation lors de la commutation ressources
 - Le générateur et l'onduleur doivent être dimensionnés pour la consommation maximale du système. De cette façon, ils fonctionnent avec un moindre rendement lors les périodes de faible charge ;
 - Une construction complexes.
- 3- La dernière configuration d'un système hybride photovoltaïque/source conventionnelle est à connexion parallèle. Ici le générateur diesel est interconnecté sur le bus de courant alternatif. L'installation photovoltaïque et la batterie sont liées sur un autre bus – de courant continu. Les deux bus sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel. Il peut travailler soit comme redresseur, lorsque le générateur diesel couvre la consommation électrique et participe dans le chargement de la batterie, soit comme onduleur, quand la charge (ou une part d'elle) est satisfaite par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie. De cette façon, la charge peut être alimentée par les deux bus simultanément. Le schéma d'un tel système hybride est représenté sur la Figure(I.14).



Figure(I.14): Système hybride à connexion parallèle [34].

Les avantages de cette configuration sont :

- Les composants du système ne doivent pas être dimensionnées pour la charge totale, parce que le consommateur peut être alimenté par les deux sources en même temps ;
- Un meilleur rendement, parce que les sources fonctionnent avec une puissance plus proche de leur puissance nominale. De plus il n'y a pas une conversion de l'énergie produite par le générateur diesel
- Diminution du nombre des convertisseurs électroniques, ce qui diminue le câblage nécessaire et l'investissement initial pour la construction du système hybride.
- Une avarie du convertisseur électronique ne provoque pas de coupure Del 'alimentation de la charge ; Les inconvénients de la configuration sont :
 - Le contrôle automatique est obligatoire pour le fonctionnement correct du système.
 - Le convertisseur électronique doit fournir une tension sinusoïdale, pour que la synchronisation avec le générateur diesel soit possible.
 - Le personnel, qui s'occupe du fonctionnement correct du système, doit être qualifié.
 - Les batteries vieillissent rapidement (pas de chargeur).
 - Le bus continu est plus difficile à contrôler [35].

I.6.1.2 Système hybride éolien/stockage

L’interconnexion du dispositif de stockage avec un générateur éolien peut avoir deux objectifs possibles : soit un rôle de tampon lorsque le système fonctionne en parallèle avec le réseau électrique, le dispositif permet alors de lisser les variations rapides de la puissance électrique en provenance de l’éolienne, soit un rôle de stockage à plus long terme, en régime autonome pour permettre l’alimentation du consommateur lors de périodes de faible vitesse du vent. Le réseau électrique peut être de grande taille, cas des Etats-Unis, ou de faible taille [35].

I.6.1.3 Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage

L’inconvénient majeur des deux systèmes hybrides précédemment décrits est le manque de diversité de l’alimentation parce que la ressource primaire utilisée est unique. Cela induit plusieurs désavantages comme par exemple le surdimensionnement des éléments dont l’objectif est d’assurer une alimentation continue, ce qui va se traduire par un investissement initial élevé (et donc limiter le développement de ces systèmes) et une augmentation du prix de kilowattheure produit. Ces inconvénients peuvent être limités ou même éliminés par l’incorporation d’une seconde source d’énergie [35].

I.6.2 Systèmes hybrides sans source conventionnelle

Les systèmes hybrides sans recours aux sources d’énergie traditionnelles sont principalement utilisés dans des zones isolées ou difficiles d'accès, où l'approvisionnement en carburant (comme le diesel) ou le raccordement au réseau électrique est coûteux ou pratiquement impossible. Ces systèmes reposent sur des sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie solaire ou éolienne, pour produire de l'électricité de manière autonome. Ils permettent d'assurer un approvisionnement énergétique durable tout en réduisant la dépendance aux combustibles fossiles. Il existe plusieurs configurations de ces systèmes, avec ou sans dispositif de stockage [38].

I.6.2.1 Système hybride photovoltaïque/stockage

L’installation photovoltaïque devra être en parallèle avec une autre source d’énergie, de sorte à pouvoir couvrir la charge durant la nuit ou les jours nuageux. Ces systèmes alimentent à la fois des parcelles de terres agricoles situées hors des zones agricoles traditionnelles, mais aussi des habitats de proximité. Certains articles comportent de la modélisation et de l’analyse, d’autres portent sur le dimensionnement optimal des composants du système. Le critère d’optimisation le plus courant est la probabilité de blackout.

Ils fournissent des résultats de six systèmes, dont une puissance totale de 6,3 kW, ainsi que des résultats d’installations hybrides dans des centres de recherche. La gestion de l’énergie a été analysée de manière stratégique par des algorithmes de suivi du point de puissance maximale, élaborés à partir de la logique floue.

La production d’hydrogène à partir du photovoltaïque est également étudiée par électrolyse, avec différentes technologies, notamment par Conibeera et Richards [08, 10]. Le stockage est parfois considéré comme plus idéal (Mulder et al., 2010), incluant un ensemble de batteries, un électrolyseur avec un réservoir d’hydrogène, ou plusieurs dispositifs de stockage. Les combinaisons les plus

courantes sont : électrolyseur et batterie (Islam et Belmans, 2004), ou électrolyseur et super condensateur (Uzunoglu et al2009).

L'idée du super condensateur est très récente. Ces derniers sont utilisés pour un stockage très court avec une faible latence de réaction, de l'ordre de quelques dixièmes de seconde. En revanche, le stockage via l'électrolyseur et la bouteille d'hydrogène est à plus long terme, mais permet de stocker de plus grandes quantités (Thounthong et al 2009).

Mulder et al. (2010) ont réalisé une étude sur un système hybride alimentant un ensemble d'habitations en parallèle avec le réseau électrique. Ce système compense automatiquement les surtensions au niveau des bornes électriques ainsi que les coupures d'alimentation durant les pannes du réseau. Différents logiciels ont été utilisés dans le cadre de ces travaux [37].

I.6.2.2 Système hybride éolien/stockage

L'interconnexion du dispositif de stockage avec un générateur éolien peut avoir deux objectifs possibles : soit un rôle de tampon lorsque le système fonctionne en parallèle avec le réseau électrique, le dispositif permet alors de lisser les variations rapides de la puissance électrique en provenance de l'éolienne, soit un rôle de stockage à plus long terme, en régime autonome pour permettre l'alimentation du consommateur lors des périodes de faible vitesse du vent. Le réseau électrique peut être de grande taille, cas des Etats-Unis (Denholm, 2006), ou de faible taille (réseau insulaire) .Les recherches se distinguent aussi par l'intervalle de temps considéré. Dans le cas d'étude de processus à variation lente, les auteurs (Korpaas et al, 2003; Nouni et al, 2007) s'intéressent à l'énergie obtenue par chacune des sources. D'autre études sont réalisées sur les processus de courte durée (Iqbal, 2003a;Shi et al, 2008). Comme pour les autres systèmes précédemment présentés, ils peuvent alimenter soit un ménage, soit un bâtiment (hôtel) et même un village. Les modes de stockage étudiés peuvent être une batterie, un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène, une combinaison des deux, un stockage par air comprimé, des aimants supraconducteurs ou une combinaison d'un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène et un super condensateur. Lorsque le système opère en parallèle avec le réseau électrique, la stratégie de gestion de la puissance joue un rôle important. Sur le plan économique, certains auteurs se contentent de donner les prix des divers organes du système, d'autres approfondissent l'analyse économique en calculant le prix du kilowatt heure produit [37].

I.6.2.3 Système hybride photovoltaïque-éolien avec stockage

Ce système combine l'utilisation de panneaux photovoltaïques et d'éoliennes, associés à un dispositif de stockage par batteries. L'énergie solaire et éolienne se complètent l'une pouvant compenser la faiblesse de l'autre en fonction des conditions climatiques. Le stockage permet de garantir une alimentation continue en électricité même en l'absence de soleil ou de vent suffisant. Cette configuration est parmi les plus efficaces pour les sites bénéficiant de ressources énergétiques naturelles variées [38].

I.6.2.4 Système hybride photovoltaïque-éolien sans stockage

Dans ce système, l'électricité produite par les panneaux solaires et les éoliennes est utilisée directement pour alimenter les charges électriques, sans dispositif de stockage. L'équilibre énergétique dépend ici de la correspondance entre la production instantanée et la demande en temps réel, ce qui le rend moins fiable que les systèmes avec stockage. Il est approprié uniquement lorsque la consommation d'énergie est synchronisée avec la disponibilité des sources renouvelables. Ce système est plus simple et moins coûteux, mais nécessite une gestion énergétique rigoureuse pour assurer la stabilité [38].

I.7 .Principaux composants d'un système hybride

L'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne ainsi que l'énergie hydraulique sont des énergies renouvelables souvent utilisées dans les systèmes hybrides. Ces systèmes peuvent inclure d'autres composants comme les convertisseurs, les batteries pour le stockage de l'énergie, les charges principales et les charges de délestage. La majorité de ces éléments fonctionnent en parallèle pour avoir un système équilibré qui permet d'atteindre un but précis [28].

I.7.1.Le générateur photovoltaïque

Une cellule galvanique constituée d'un matériau semi-conducteur peut convertir l'énergie photonique reçue à sa surface en une différence de potentiel, qui est créée en délocalisant les électrons dans le matériau. Le spin de l'électron dans le circuit à l'extérieur de la cellule photovoltaïque lui permet de jouer le rôle de générateur. Les cellules photovoltaïques sont fusionnées pour former des modules photovoltaïques, qui peuvent produire une certaine quantité d'énergie dans différentes conditions d'éclairage et de température. Ensuite, les modules PV peuvent être assemblés séquentiellement pour former un générateur PV. Elle est mesurée en fonction de la puissance requise pour une installation particulière [28].

I.7.2.Générateur éolien

Un système éolien ou un aérogénérateur ou encore une éolienne peut être défini comme étant : un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique. La plupart des aérogénérateurs commerciaux, surtout les grands, sont à axe horizontal. La part de marché représentée par les systèmes à axe vertical est minuscule. Les aérogénérateurs de grande taille sont parfois construits isolément ou rassemblés en groupes (parcs d'éoliennes) comportant dix éléments ou plus, parfois même des centaines. Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire [36].

I.7.3Les batteries de stockage

Le dispositif de stockage est l'élément clé d'un système Hybride, car c'est grâce à lui qu'il stocke l'énergie non consommée par les sources (énergie électro-photovoltaïque, énergie éolienne) pour humecter à un autre moment lorsque la production d'énergie est faible, car il a un rôle important dans la permanence la présence des forces en tout moment avant tout. Pour cela, cela nécessite que l'énergie produite par les centrales lâche dedans pour être compatible avec le groupe d'énergie. Consommé par le membre du public et dévorée par le système lui-même [39]. Or, une installation

d'inertie ne garantit pas une production d'énergie importante à tout moment il n'est pas impossible qu'il ya un moment où la pompe extra rassemble de l'eau depuis la fosse et celle-ci arrive dans le sol 1/3 du heure et la pompe premières par 2.5m et au porte à sec la pompe POMPE est néanmoins efficace à condition de contenir dans la fosse un volume d'eau pour tout le réflexion puisque dans le gare souterraine (sous le puits) relevé à la machine faible pourcentage dans quelques cas de l'énergie produite ne perturbera pas la consommation. La seule façon de résoudre ce problème de scanners est de mettre en place le lancement de stockage.

I.7.4 .Convertisseurs :

Dans un SEH on emploie des convertisseurs pour recharger des batteries de stockage et transformer le CC en CA et vice-versa. Il existe trois types de convertisseurs, fréquemment rencontrés dans les SEH, les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs. Les redresseurs assurent la conversion CA/CC. Dans le SEH sont alors fréquemment employés pour recharger une batterie à partir d'un CA. Ces appareils sont relativement simples, peu coûteux donc au bon rendement. Les convertisseurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle aux sources à CA. Les onduleurs travaillent en autonomie lorsqu'ils fixent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome nécessite un CA source pour fonctionner. Il existe également des onduleurs qui garantiront les deux modes de fonctionnement : autonome et en parallèle d'un autre générateur. Ils sont le plus flexibles mais le plus coûteux. Par occasion, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont assurées par un même appareil [36].

I.7.5.Charges

Les charges électriques, faites, la puissance électrique. Il y a des contraventions à caractère résistif et inductif. Les appareil résistif sont les ampoule a incandescence, chauffe-eaux etc. Les appareils a machine électrique constituent des appareils résistif et inductives. Elles sont le principal consommé de puissance réactive. Les charges à CC ont aussi des composants inductifs, mais les seuls effets entrés en jeu grâce à ceux-ci sont, les fluctuations professionnelles de tension et d'écoulement au cours des modifications du fonctionnement du système [36].

Chapitre II

Modélisation du système hybride

II.1 Introduction

La croissance rapide de la demande énergétique mondiale, combinée aux préoccupations environnementales liées à l'épuisement des ressources fossiles et aux émissions de gaz à effet de serre, a stimulé l'intérêt pour les énergies renouvelables. Parmi les solutions émergentes, les **systèmes hybrides** combinant plusieurs sources d'énergie — notamment **photovoltaïque (PV)**, **éolienne** et **générateur diesel (GD)** — offrent une alternative intéressante pour garantir un approvisionnement énergétique fiable, durable et économiquement viable, en particulier dans les régions isolées ou non connectées au réseau.

Un **système hybride PV-Éolien-GD** intègre les avantages complémentaires des différentes sources d'énergie. L'énergie solaire est abondante pendant la journée, tandis que l'énergie éolienne peut être disponible aussi bien de jour que de nuit. Le générateur diesel intervient principalement pour assurer la continuité de l'alimentation en cas de défaillance ou d'insuffisance des ressources renouvelables, améliorant ainsi la fiabilité globale du système. Cette complémentarité permet de réduire la consommation de carburant fossile, d'abaisser les coûts d'exploitation et de limiter l'empreinte environnementale.

La **modélisation** d'un tel système est une étape cruciale pour son dimensionnement, son optimisation et sa gestion efficace. Elle consiste à représenter mathématiquement le comportement de chaque composant du système (panneaux photovoltaïques, éoliennes, générateur diesel, batteries, convertisseurs, etc.), ainsi que leurs interactions. Cette démarche permet d'évaluer les performances énergétiques et économiques du système en fonction des profils de charge, des conditions climatiques locales et des stratégies de gestion adoptées.

L'objectif de cette étude est donc de développer une modélisation rigoureuse d'un système hybride PV-Éolien-GD, permettant d'optimiser sa configuration, de minimiser son coût global sur la durée de vie, et d'assurer une fourniture énergétique fiable tout en intégrant un maximum d'énergies renouvelables. Cette approche s'inscrit dans une logique de transition énergétique durable, en adéquation avec les objectifs mondiaux de réduction des émissions de carbone.

Dans ce contexte, ce travail s'articulera autour de plusieurs axes principaux :

- La caractérisation des ressources énergétiques locales (irradiation solaire, vent).
- La modélisation des composants du système hybride.
- Le dimensionnement optimal des différentes unités.
- L'élaboration d'une stratégie de gestion énergétique efficace.
- L'évaluation technico-économique et environnementale du système proposé.

II.2 Modélisation D'un Système Hybride

La modélisation est un moyen destiné à représenter par une forme mathématique une fonction ou un processus technologique. Elle a pour but d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres et les optimiser en respectant une contrainte donnée.

II.2.1 La modélisation d'une cellule solaire

II.2.1.1 Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque

On a pris le modèle fréquemment utilisé afin de décrire les caractéristiques électriques.

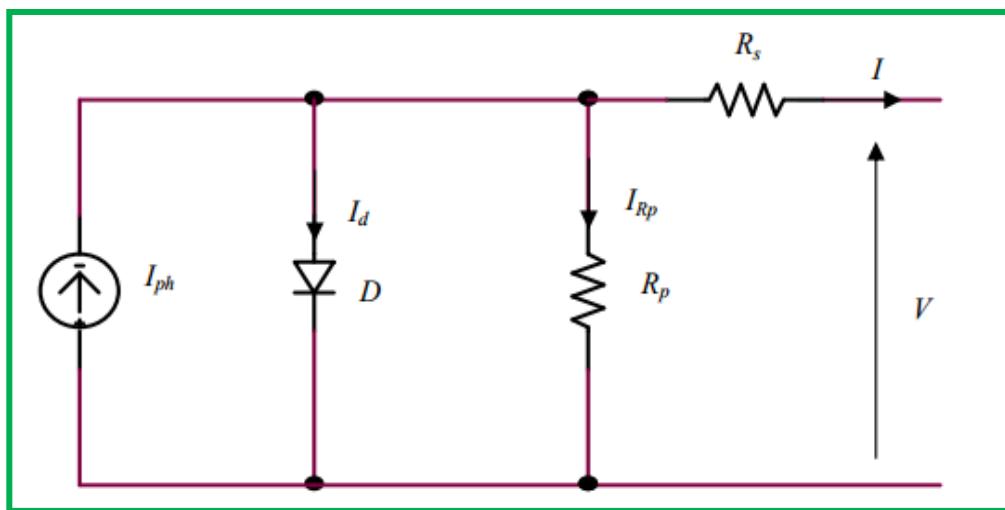


Figure (II.1): Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.

R_p : représente la résistance shunt qui modélise les fuites par l'effet de bord autour de la cellule solaire.

R_s prend en considération les contacts ohmiques entre le métal et le semi-conducteur ainsi que la résistance intrinsèque du silicium.

I_{ph} est le courant photovoltaïque engendré par les radiations lumineuses, et la diode D représente la jonction PN de la cellule.

I et V : sont respectivement le courant et la tension de sortie.

A partir du modèle précédent, on a d'après la loi de Kirchhoff [47]:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{RP} \quad (\text{II.1})$$

D'autre part $I_{cc} = I_{ccr} \frac{G}{1000}$ (II.2)

Où

I_{ccr} est le courant de court-circuit de référence (correspondant à un éclairement de référence de 1000 W/m^2) et G (W/m^2) est l'éclairement solaire.

De plus, le courant absorbé par la résistance parallèle est donné par :

$$I_{R_P} = \frac{V + IR_s}{R_P} \quad (\text{II.3})$$

Et le courant traversant la diode est exprimé par :

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{nV_T} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.4})$$

Où

V_T est la tension thermique, elle est donnée par :

$$V_T = \frac{KT_c}{q} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

- I : Le courant de cellule.
- V : La tension de cellule.
- R_s : La résistance série de la cellule [Ω].
- T_c : La température effective de la cellule en Kelvin [$^{\circ}\text{K}$].
- q : La charge d'électron $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$.
- I_0 : Le courant de saturation [A].
- K : La constante de Boltzmann $(1.3854 \times 10^{-2} \text{ JK}^{-1})$.
- n : Le facteur de qualité de diode.

II.3 Caractéristique d'une cellule solaire[48]

Une cellule photovoltaïque est caractérisée principalement par :

a) Courant de court-circuit

I_{sc} Le courant de court-circuit est le courant débuté par la cellule sous éclairement en court-circuitant la sortie. C'est à dire que:

$$I_{sc} = I(V = 0)$$

Tension de circuit ouvert, V_{co}

La tension de circuit ouvert est la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule lorsque la sortie est en circuit ouvert. C'est-à-dire

$$V_{co} = V(I = 0) \quad (\text{II.6})$$

c). Réponse spectrale, $SR(\lambda)$.

Le rapport du courant total généré par la cellule au courant pouvant être généré pour chaque longueur d'onde du spectre incident est appelé réponse spectrale d'une cellule solaire. Il renseigne sur la réaction de la cellule au rayonnement incident et permet de sélectionner la plage de fonctionnement de la cellule:

$$SR(\lambda) = \frac{I_{PH}(\lambda)}{qf(\lambda)(1 - R(\lambda))} \quad (\text{II.7})$$

Puissance maximale, P_m

La puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand la produit $V \cdot I$ est maximum. Si V_m et I_m sont la tension et le courant pour lesquels on a ce maximum, la puissance maximale est la surface du plus grand rectangle de cotés V_m et I_m :

$$P_m = (V \cdot I)_{max} = I_m \cdot V \quad (\text{II.8})$$

e). Facteur de forme, FF

On appelle facteur de forme, le rapport de la puissance maximale au produit $I_{sc} \cdot V_{co}$. Le facteur de forme indique la qualité de la cellule, il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_{set} R_{sh}

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc} V_{co}} \quad (II.9)$$

Rendement de conversion, η

Le rendement de conversion d'une cellule solaire est le rapport de la puissance maximale pouvant être extraite à la puissance du rayonnement incident

$$\eta = \frac{P_m}{A \cdot P_i} = \frac{I_{sc} V_{co} FF}{A \cdot P_i} \quad (II.10)$$

Où : A est la surface de la cellule

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court circuit et la tension à circuit ouvert.

II.4 Association des cellules [51]

II.4.1 Association en série des cellules Photovoltaïques

Les cellules sont connectées en série en soudant le contact devant de chaque cellule au contact arrière de la suivante.

Si on assemble en série des cellules, la tension aux bornes de l'assemblage est égale à la somme des tensions délivrées par chacune des cellules :

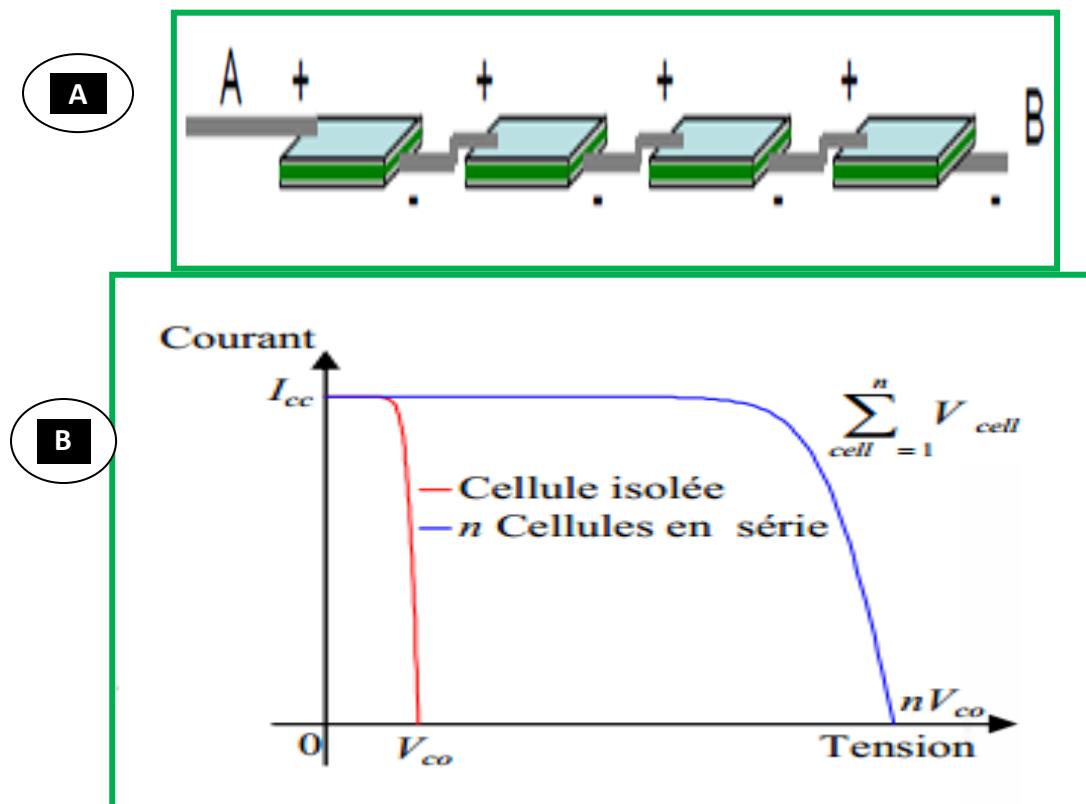
$$V = \sum_{cell=1}^n V_{cell} \quad (II.11)$$

Avec :

V : Tension aux bornes de l'assemblage ;

V_{cell} : Tension aux borne de la cellule d'indice "cell"

Dans ce cas, le courant qui traverse les cellules est le même mais les cellules peuvent fonctionner à des tensions différentes.



Figure(II.2) : Cellule solaire connectées en série et leur caractéristique courant-tension.

Si une cellule est occultée (si elle ne reçoit plus qu'une faible partie de l'énergie solaire reçue par les cellules voisines), elle ne peut délivrer qu'un courant limité. Elle fonctionne donc en inverse (comme un récepteur soumis à une tension inverse de celle produite en direct) par rapport aux autres cellules du module qui délivrent un courant supérieur à ce courant limité. En fonctionnant ainsi, un échauffement de la cellule apparaît et pourrait provoquer son claquage.

Pour limiter la tension inverse maximum susceptible de se développer aux bornes d'une cellule, les fabricants de modules Photovoltaïques placent une diode parallèle, appelée diode by-pass, toutes les 18 à 36 cellules (selon les applications).

II.4.2 Association parallèle des cellules Photovoltaïques

Dans le cas d'un montage en parallèle, le courant de l'ensemble sera égal à la somme des courants produits par chacune des cellules :

$$I = \sum_{cell=1}^n I_{cell} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

I : Courant circulant dans l'assemblage.

I_{cell} : courant circulant dans chaque cellule d'indice "cell".

Dans le cas d'une association en parallèle, les cellules délivrent la même tension mais elles peuvent fonctionner avec des courants différents.

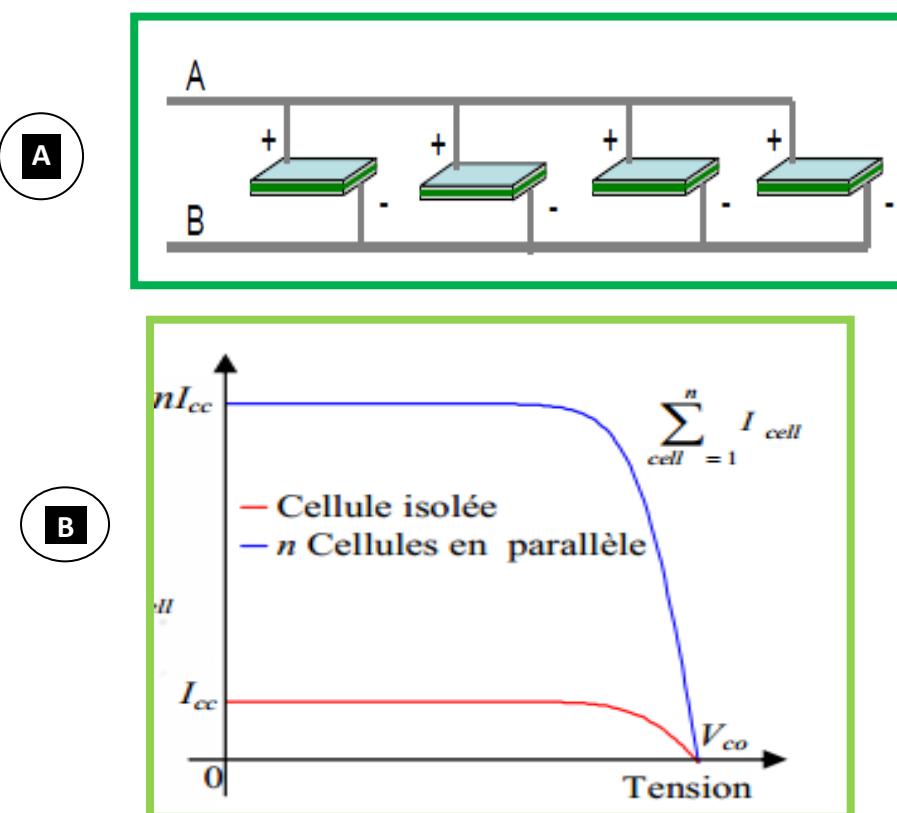


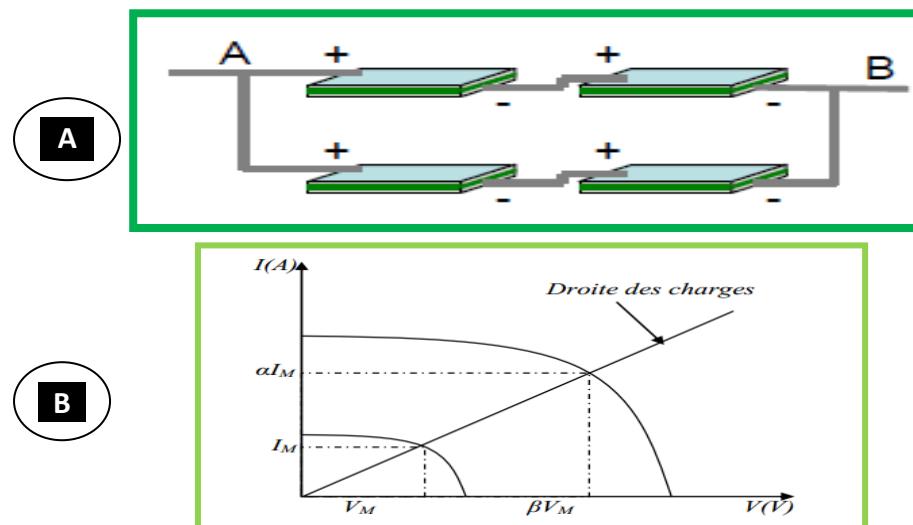
Figure (1I.3) : Cellule solaire connectées en parallèle et leur caractéristique courant-tension.

Cependant, si une ou plusieurs cellules sont occultées, les autres deviennent réceptrices car la tension de fonctionnement est supérieure à la tension de circuit ouvert. Bien qu'une cellule puisse dissiper un courant important, il est préférable de disposer d'une diode anti-retour, laquelle empêche également de gaspiller dans une autre cellule occultée une partie de la puissance produite par les cellules fonctionnant normalement. Pour limiter ces pertes et protéger les cellules, on place donc une

Diode en série, appelée diode série, toutes les n cellules (n étant fonction des caractéristiques du montage).

II.4.3 Association mixte série-parallèle des cellules Photovoltaïques

Dans ce cas, on monte en dérivation des ensembles de panneaux montés en série (on peut aussi monter en série des ensembles de panneaux montés en dérivation)



Figure(II.4):Cellules solaires connectées en série-parallèle.

Comme on peut le constater ci-dessous, dans le cas du branchement série la courant traversant les cellules reste identique et la tension varie. Dans celui parallèle, la tension aux bornes des cellules reste identique tandis que le courant varie.

II.5 Types de systèmes Photovoltaïques

Les systèmes Photovoltaïques peuvent être classés en deux types : autonomes et hybrides

II.5.1 Système autonomes

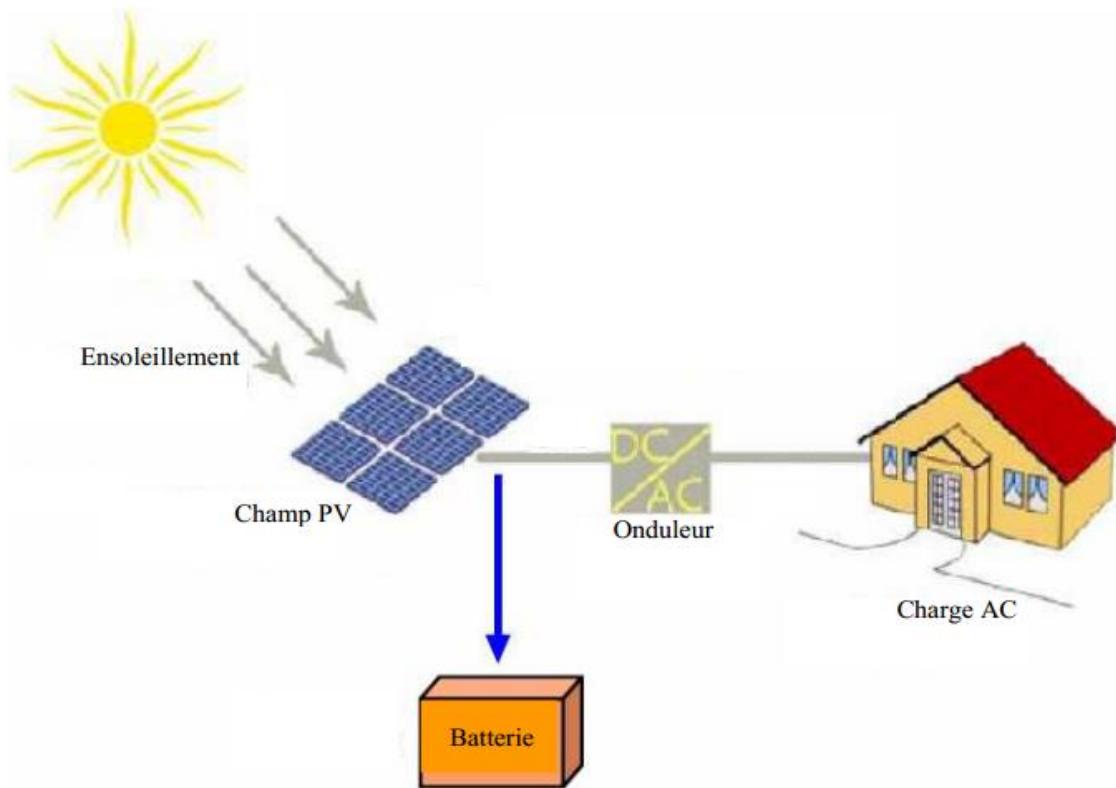
C'est un système Photovoltaïques complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie.

Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau.

En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique.

Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau.

En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique.



Figure(I1.5): système Photovoltaïques autonome.

II.5.2 Le système photovoltaïque non autonome

Ce sont des systèmes qui travaillent 24 h/24 h avec l'énergie solaire convertie en énergie électrique plus l'aide d'autres sources d'énergie électrique. Il faut noter que les deux systèmes autonomes et non autonome sont de même dimension

II.6 Les Avantages et les Inconvénients du photovoltaïques

II.6.1 Avantages du photovoltaïque

- -le gisement solaire potentiellement important
- -sa fiabilité et sa robustesse (pas de pièce en mouvement)
- -sa modularité (souplesse du dimensionnement)
- -son impact environnemental quasiment nul, hors recyclage (aucune émission sonore)

II.6.2 Inconvénients du photovoltaïque

- -sa faible puissance spécifique due à un faible rendement de conversion
- -son prix élevé (investissements conséquents)

II.7 Effet de l'éclairement et de la température sur la courbe I-V dans les systèmes photovoltaïques [49].

La température et l'irradiante solaire sont deux facteurs essentiels influençant directement les performances électriques des modules photovoltaïques, notamment en ce qui concerne les caractéristiques courant-tension (I-V). Le courant de sortie d'un module photovoltaïque est proportionnel à l'irradiante, tandis que la température affecte principalement la tension en circuit ouvert. En général, une augmentation de l'irradiante entraîne une hausse du courant généré, alors qu'une élévation de la température provoque une diminution de la tension, ce qui peut réduire la puissance électrique totale produite.

Pour une évaluation précise de ces grandeurs, un pyranomètre est utilisé pour mesurer l'irradiante incidente sur la surface du module photovoltaïque. Des thermocouples placés à des points stratégiques servent à mesurer la température ambiante ainsi que celle du panneau. Un capteur est positionné à l'ombre pour représenter les conditions thermiques ambiantes, tandis qu'un autre est fixé à l'arrière du panneau afin d'enregistrer l'échauffement réel de celui-ci.

Les données recueillies sont ensuite traitées par des systèmes de gestion de l'énergie, utilisant des cartes d'acquisition de données couplées à des interfaces logicielles telles que LabVIEW, permettant une collecte et un enregistrement efficaces en temps réel. Ces données sont ensuite analysées à l'aide de logiciels comme Microsoft Excel afin d'évaluer le comportement du système dans différentes conditions de fonctionnement.

Les cellules photovoltaïques en silicium poly cristallin (multi-Si), comme celles du module NeMo® 54 P, présentent des caractéristiques thermiques et électriques spécifiques. L'étude de ces caractéristiques à partir des données de performance et des fiches techniques permet une meilleure compréhension de l'influence des variables environnementales sur le rendement des modules photovoltaïques.

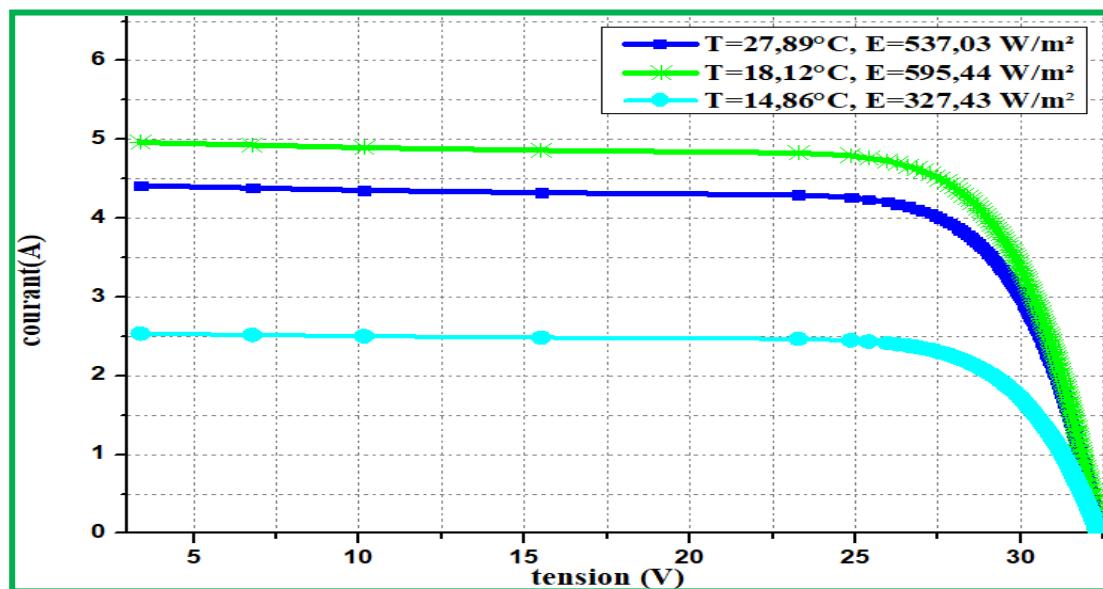


Figure (II.6):Caractéristiques I-V du module PV pour différentes valeurs de température et L'éclairement (type Polycrystalline NeMo54P)

II.7.1. Influence des résistances série et shunt [47]

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible. La figure a (II.7) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule. La courbe en pointillés correspond à une valeur non nulle de R_s . Cette influence est traduite par une diminution de la pente de la courbe $I = f(V)$ dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension (à droite de la figure). La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule.

Quand à la résistance shunt, elle est liée directement au processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs de courant. La figure b (II.7) montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme source de courant (à gauche de la figure). Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant outre le directe de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée.

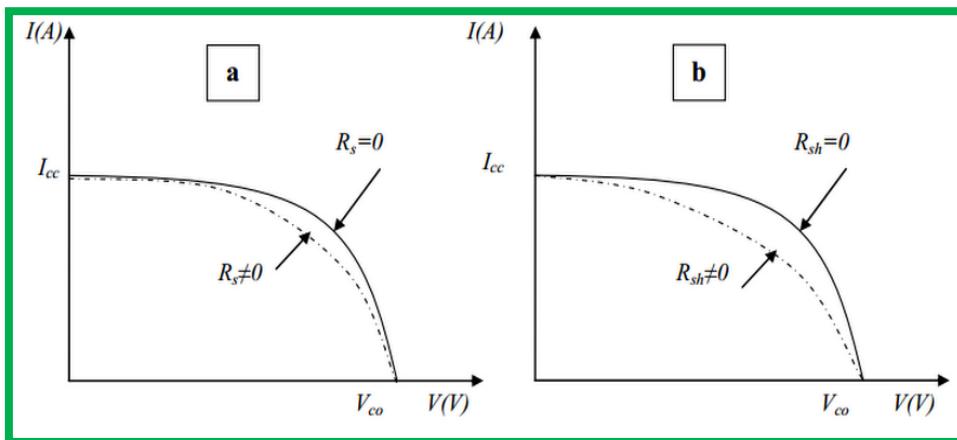
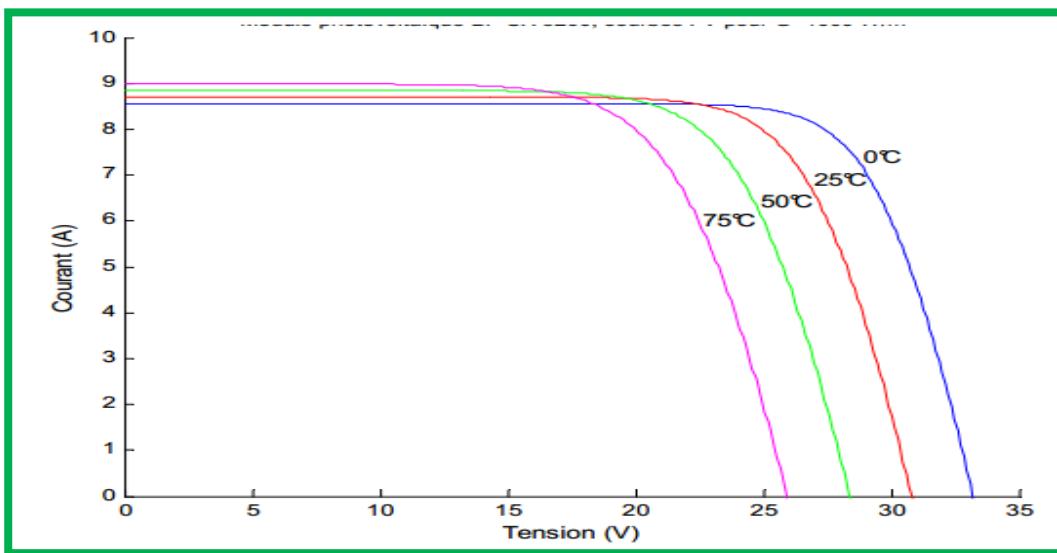


Figure (II.7) Influences des résistances séries et shunts

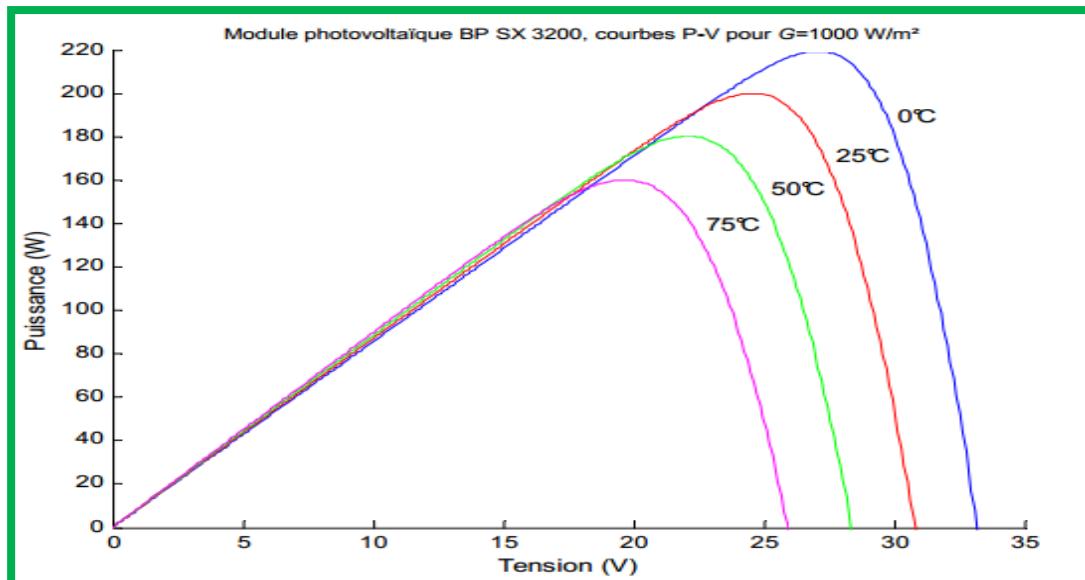
II.7.2 Influence de la température de cellule photovoltaïque [47].

Comme nous l'avions expliqué précédemment, la base des cellules photovoltaïque qui constituent un module solaire est une jonction PN . Ceci nous laisse envisager que son rendement variera selon la température de la jonction. La figure (II.8) montre que la tension à vide d'un module solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule. L'ordre de grandeur de la chute de tension est de 2.3 mV par degré Celsius par cellule.

Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température de la cellule (environ 0.05% par degré Celsius). La figure (II.8) montre clairement la baisse du rendement causée par l'augmentation de la chaleur sur la cellule.

Figure(II.8): effet de la température sur la $I-V$

On peut remarquer sur la figure (II.9) que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible de l'ordre de ($5 \times 10^{-5} \text{W}^{\circ}\text{C}$) par cm^2 de la cellule

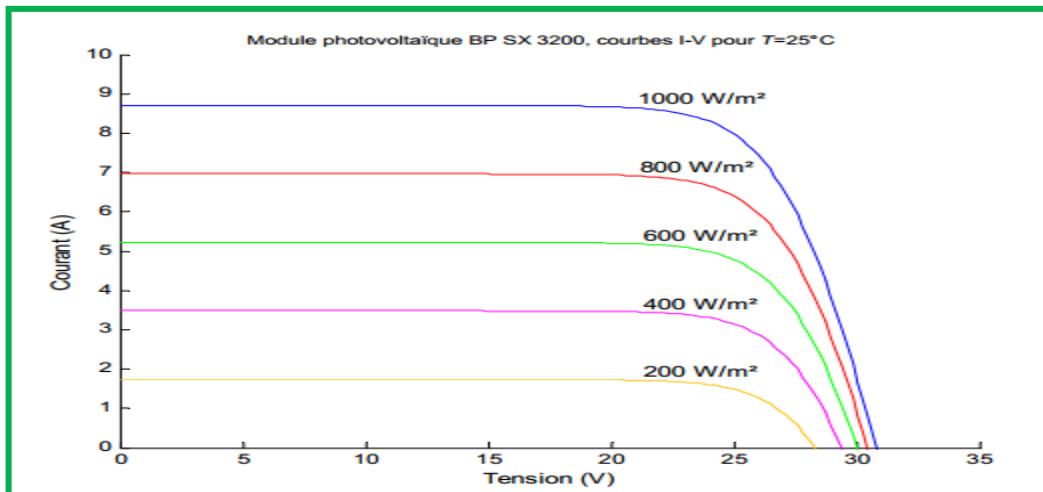
Figure(II.9): Effet de la température sur la $P-V$

II.7.3 Influence de l'ensoleillement de cellule photovoltaïque

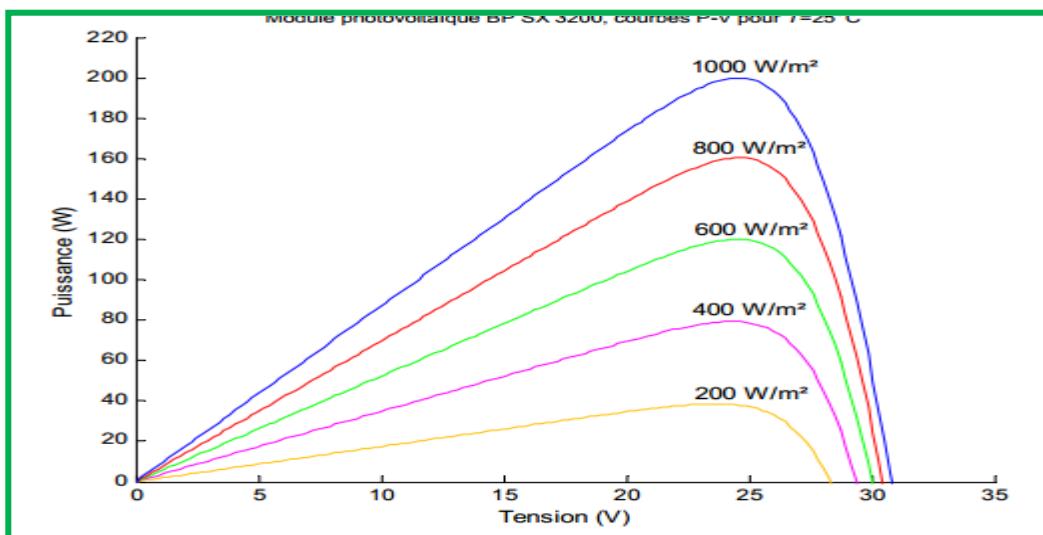
De la même manière que pour la température, la jonction PN réagit différemment selon l'énergie qu'elle reçoit par ensoleillement. Plus elle reçoit l'énergie plus elle en restitue, mais toujours avec un coefficient de rendement très faible de l'ordre de 15% [12]. La variation des caractéristiques est représentée sur les courbes de la figure (II.10). Pour différents niveaux d'irradiation, le changement du courant optimal est très important. Ceci confirme l'approximation

faite classiquement sur le courant optimal délivré par un module PV qui est globalement proportionnel au niveau d'irradiation. Nous pouvons le voir aussi sur la figure (II.11).

Selon les conditions météorologiques, nous obtenons différents courbes avec différentes puissances maximales au cours d'une même journée. Nous remarquons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert face à une chute du flux lumineux.



Figure(II.10) : Effet de la l'éclairement sur la I - V .



Figure(II.11) : Effet de la l'éclairement sur la P - V .

II.8 Modélisation d'une turbine éolienne [52].

La vitesse du vent qui représente la grandeur d'entrée du système de conversion d'énergie éolienne, a une variation aléatoire et a une caractéristique très fluctuante. Alors la modélisation de la turbine éolienne est indispensable et cela pour une meilleure exploitation de la vitesse du vent.

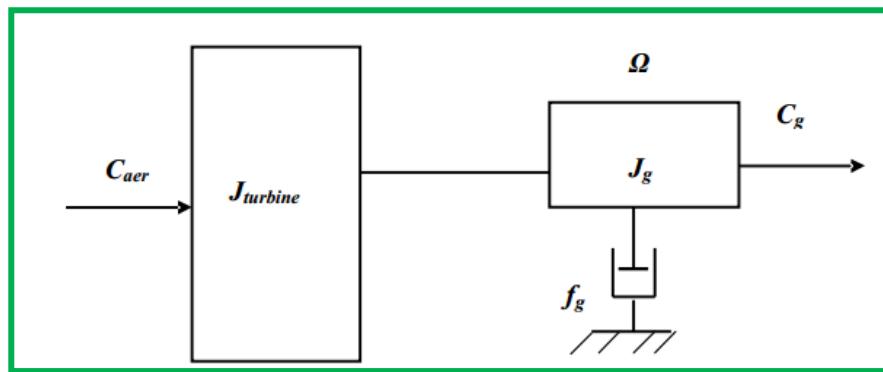


Figure II.12 : Modèle mécanique simplifié de la turbine.

J_{turbine} : le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne.

J_g : le moment d'inertie du générateur.

f_g : Le coefficient dû aux frottements visqueux du générateur.

C_g : le couple mécanique sur l'arbre du générateur.

Ω : La vitesse de rotation du générateur.

II.10.1 Modélisation de la turbine

La turbine éolienne étudiée ici, est constituée de pales de longueur R entraînant une

Générateuse électrique avec l'intermédiaire de l'arbre de la turbine (figure (II.13)).

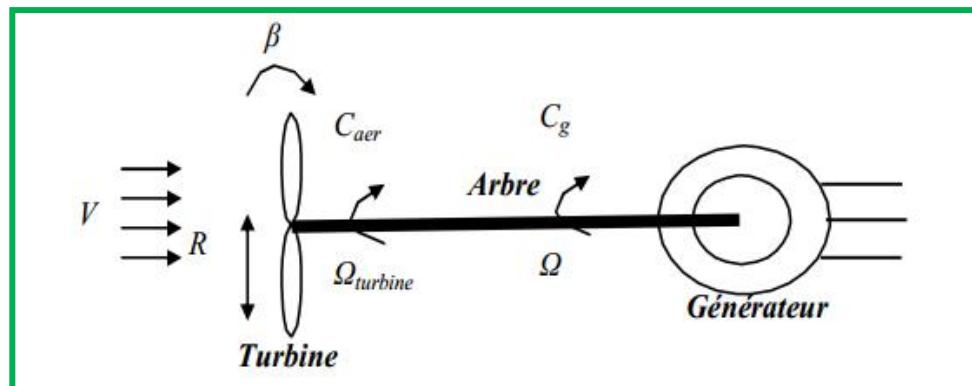


Figure (II.13): Schéma de la turbine éolienne

La puissance du vent P_V ou puissance éolienne est définie de la manière suivante.

$$P_V = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad \text{II.13)$$

ρ : est la densité de l'aire (approximativement 1.225 Kg/m³ à la pression atmosphérique à 15°C),

S : est la surface balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale

V : la vitesse du vent.

II.10.2 Modèle aérodynamique (coefficient de puissance)

La puissance aérodynamique P_{aer} apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit:

$$P_{aer} = C_p \cdot P_V = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (\text{II.14})$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. Ce coefficient est en fonction du ratio de vitesse λ et de l'angle d'orientation de la pale β .

Le coefficient λ est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent.

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V} \quad (\text{II.15})$$

$\Omega_{turbine}$: est la vitesse de la turbine

R : la longueur de la pale

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique peut être donné comme suit :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2 \cdot \Omega_{turbine}} \quad (\text{II.16})$$

II.10.3 Modèle du multiplicateur

Le rôle du multiplicateur est l'adaptation de la vitesse lente de la turbine à la vitesse nominale de la génératrice s'il est nécessaire. Ce multiplicateur est peut être modélisé mathématiquement par les équations suivantes.

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (\text{II.17})$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega}{G} \quad (\text{II.18})$$

II.10.4 Modélisation de l'arbre de la turbine

La masse de l'éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. L'inertie totale de l'arbre J

qui apparaît sur le rotor de la génératrice peut être donnée comme suit.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g = J_{turbine} + J_g \quad (\text{II.19})$$

G^2 : est le gain du multiplicateur égal à 1 dans notre cas.

J_g : l'inertie de la génératrice électrique.

Il est à noter que le moment d'inertie de la génératrice peut être négligé devant l'inertie de la turbine et cela dans le cas des grosses éoliennes. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total

(C_{mec}) appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{mec} \quad (\text{II.20})$$

Le couple mécanique C_{mec} prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_r , et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_r \quad (\text{II.21})$$

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_r = f \cdot \Omega \quad (\text{II.22})$$

L'expression du coefficient de puissance C_p est spécifique à chaque éolienne et dépend des caractéristiques intrinsèques de celle-ci. Si on suppose que l'angle de calage β ($\beta = 2$) est fixe, l'expression du C_p en fonction de λ seulement peut être donné comme suit.

$$C_p = 7,9563 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^5 - 17,375 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^4 + 9,86 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda^3 - 9,4 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda^2 + 6,38 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda + 0,001 \quad (\text{II.23})$$

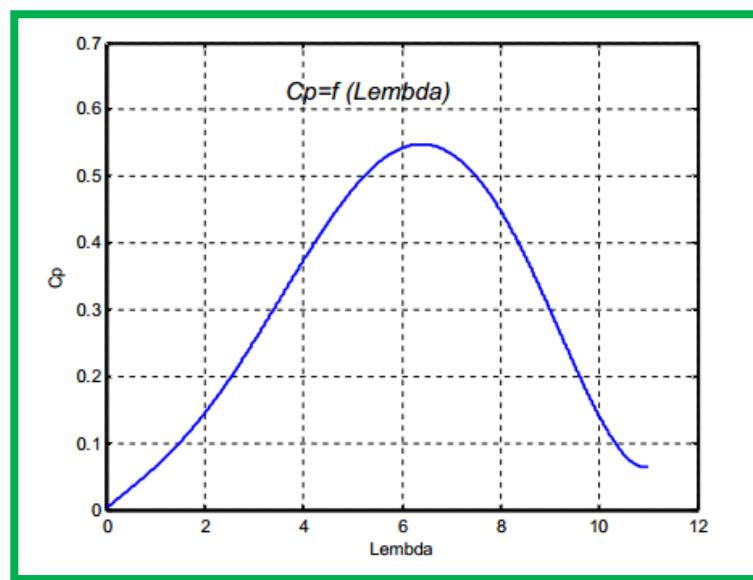


Figure II.14 : Evolution du C_p en fonction de lembda

De la figure , on peut déduire que le $C_{p_{\max}} = 0.54$ et $\lambda_{C_{p_{\max}}} = 6.41$. Le modèle de notre turbine à axe horizontal sur la plateforme Simulink du logiciel Matlab avec les données suivantes : « $R = 1\text{m}$; $r = 1.22 \text{ kg/m}^3$ » donne les résultats suivants :

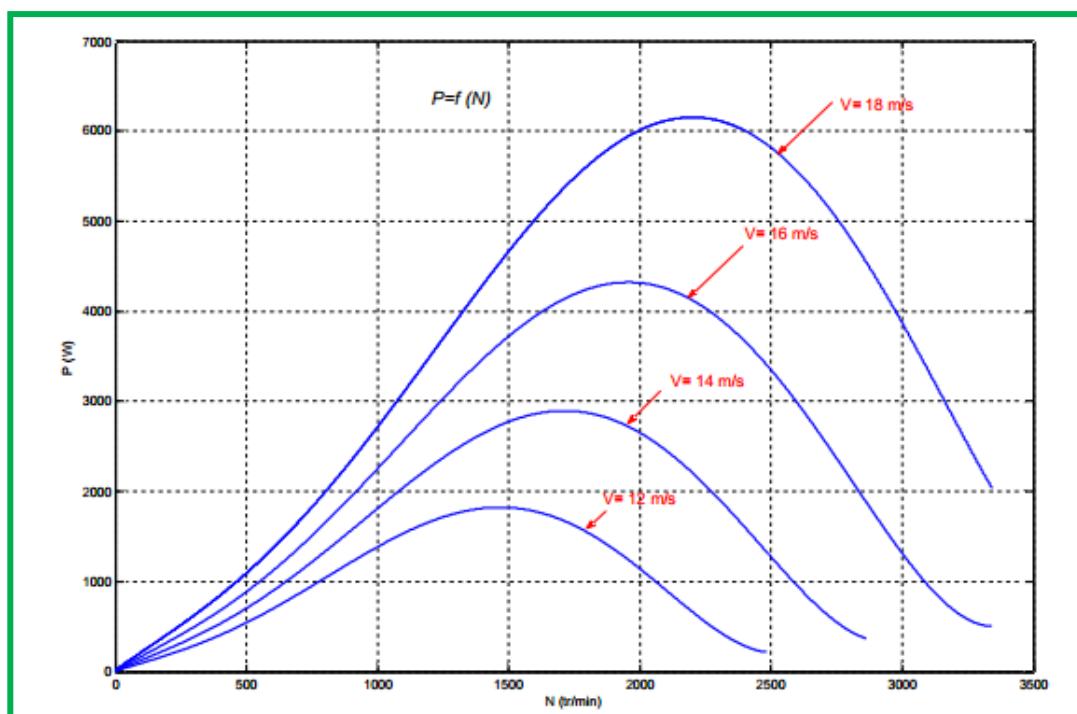


Figure II.15 : La puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse.

On remarque de la figure que la puissance électrique est variable avec la variation de la vitesse angulaire mécanique de la turbine. L'allure de la puissance en fonction de la vitesse angulaire est semblable à celle du C_p en fonction de λ (ratio de vitesse). On remarque aussi que plus la vitesse du vent est grande plus de puissance délivrée est grande et qui est tout à fait normal car la puissance est exprimée par la vitesse cube du vent.

II.11 Modélisation d'un Générateur

II.11.1 Hypothèses de Modélisation

- Le générateur fonctionne avec un moteur diesel.
- Il est supposé fonctionner à un régime stable lorsqu'il est en marche.
- La consommation de carburant dépend principalement de la puissance fournie.
- Les pertes sont incluses dans un rendement global.

II.11.2 Modèle Mathématique

II.11.1.1 Puissance Produite

La puissance électrique produite par le générateur, P_{gen} , est donnée par :

$$P_{gen} = V_{out} \times I_{out} \times \eta_{gen}$$

avec :

- V_{out} : tension de sortie (V),
- I_{out} : courant de sortie (A),
- η_{gen} : rendement du générateur (entre 0,85 et 0,95).

II.11.1.2 Consommation de Carburant

La consommation horaire de carburant F (litres/heure) peut être modélisée par :

$$F = a \times P_{gen} + b \quad (\text{II.24})$$

avec :

- a : coefficient de consommation proportionnel à la charge (L/kWh),
- b : consommation au ralenti (L/h).

Remarque : Les valeurs de a et b sont déterminées expérimentalement ou fournies par le fabricant.

II.11.1.2 Rendement du Générateur

Le rendement η_{gen} varie avec la charge. Approximativement :

$$\eta_{gen} = \eta_{nominal} \times \left(\frac{P_{gen}}{P_{nominal}} \right) \quad (\text{II.25})$$

Avec :

- $P_{nominal}$: puissance nominale du générateur.

II.11.1.3 Stratégie de Fonctionnement

Dans un système hybride, le générateur est contrôlé pour :

- Démarrer lorsque la charge est supérieure à la production renouvelable + batteries.
- Fonctionner dans une plage optimale pour éviter surcharge ou ralenti prolongé.

II.12 Modélisation de système de stockage [batterie]

Vue la grande diversité de type d'éléments de batterie ainsi le nombre très varie de paramètres

Qui interviennent, une représentation très empirique du comportement de la batterie peut être

Établie. Il existe plusieurs modèles de la charge de batterie

Pour notre étude, nous avons utilisé le modèle de Bogdan et Salmeh 1996) qui permet de
Calculer la capacité de stockage en fonction de la puissance produite par le système hybride
Éolien –photovoltaïque et la charge demandée

II.12.1 Modèle de la charge de la batterie

Quand la puissance de générateur PV est plus grand que la charge, les batteries sont à l'état de Charge, la capacité des batteries au temps t peut s'écrire par

$$C_{Bat(t)} = C_{Bat}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + (P_{PV}(t) - P_L(t) / \eta_{ond}) \cdot \eta_{Bat} \quad (\text{II.25})$$

$C_{Bat(t)}$: La quantité de la charge de batterie au temps (t).

$C_{Bat}(t-1)$: La quantité de la décharge de batterie au temps (t-1).

σ : Est le taux horaire de la charge spontané.

P_{PV} : Est la puissance de générateur PV.

P_L : Est la charge demandée au temps t.

η_{ond} : Le rendement de l'onduleur.

η_{Bat} : Le rendement de la batterie.

II.11.2 Modèle de la décharge de la batterie

Quand la demande de charge est plus grande que la puissance produite, la capacité des batteries au temps t peut exprimer comme suite :

$$C_{Bat(t)} = C_{Bat}(t-1)(1-\sigma) + (P_L(t)/\eta_{inv} - P_{PV}(t)) \quad (\text{II.26})$$

II.11.3 La tension de la batterie

Le modèle suivant, décrit la relation entre le voltage, courant et l'état de charge. Ce modèle basé sur le schéma électrique de la figure (II.16).

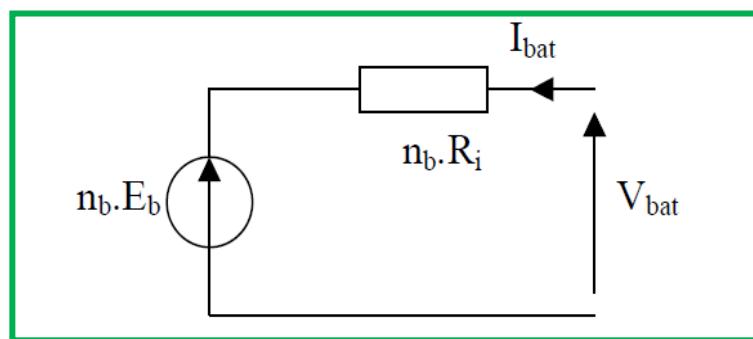


Figure II.16: schéma électrique équivalent de n_b éléments de batteries en séries

Pour n_b batterie en série, nous pouvons écrire l'équation :

$$V_{Bat} = n_b \cdot V_{co} + n_b \cdot R_{Bat}(t) \cdot I_{Bat}(t) \quad (\text{II.27})$$

V_{Bat} : La tension de batterie au temps t.

I_{Bat} : Le courant de batterie au temps t.

R_{Bat} : La résistance interne de batterie.

n_b : 1

$$V_{co}(t) = VF + b \cdot \log(SOC(t)) \quad (\text{II.28})$$

VF : est la force électromotrice (V)

b : est une tension empirique

Pour une batterie de plomb acide, les paramètres sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau(II.1) : Les paramètres pour une batterie de plomb acide

Paramètre	Mode de charge	Mode de décharge
VF	13.250 V	12.662 V
B	0.810	0.724

Conclusion

La modélisation d'un système hybride combinant des sources photovoltaïques, éoliennes et un générateur diesel constitue une approche stratégique pour répondre aux défis liés à l'approvisionnement énergétique, particulièrement dans les zones isolées ou faiblement électrifiées. En tirant parti de la complémentarité entre l'énergie solaire et éolienne, et en utilisant le générateur diesel en tant que solution de secours, il est possible d'assurer une alimentation électrique fiable, tout en réduisant la dépendance aux carburants fossiles et les impacts environnementaux associés.

À travers le processus de modélisation, chaque composant du système est représenté de manière mathématique et dynamique, permettant une analyse précise du comportement global du système en fonction des variations climatiques et des profils de demande. Cette démarche est indispensable pour dimensionner correctement les équipements, optimiser l'investissement initial, minimiser les coûts d'exploitation et maximiser la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique local.

Ainsi, la modélisation d'un système hybride PV-Éolien-GD s'impose comme une étape clé pour la conception de solutions énergétiques durables, adaptées aux besoins spécifiques des utilisateurs et aux caractéristiques des ressources locales. Elle ouvre également la voie au développement de stratégies de gestion intelligente de l'énergie, visant à favoriser l'autonomie énergétique et à soutenir les objectifs de transition énergétique à l'échelle locale et mondiale.

Chapitre III

Optimisation et simulation d'un système d'énergie

III.1. Introduction

La configuration du SEH dépend évidemment des ressources énergétiques disponibles ainsi que des contraintes de l'utilisation. Ceci requiert une campagne de mesure et une analyse préalable des spécificités du site. Pour créer une base de référence pour notre étude nous avons choisi d'adopter des données disponibles et accessibles (NASA) Données satellites mondiaux de la NASA. Disponible sur le site Web « NASA Surface météorologie and Solar Energy Data Set ».

A présent il existe divers dispositifs de simulation, parmi eux HOMER, sont utilisés dans les milieux universitaires. C'est pourquoi, dans ce travail, nous étudierons le principe de l'étude de modélisation et d'optimisation d'un système hybride (photovoltaïque – éolienne – générateur diesel) autonome. Par ailleurs, nous avons déterminé, en utilisant toujours HOMER.

Le site considéré dans cette étude représente un site à willaya de TIMIMOUN situé au Sud Algérien.

III.2. Présentation du logiciel HOMER

III.2.1. Définition du logiciel HOMER

Le logiciel de modélisation énergétique HOMER (Hybrid Optimisation Model for Electric Renewables) a été initialement développé le 1993 par de National Renewable Energy Laboratory pour les programmes d'électrification rurale. Depuis 2009, il est disponible sous la licence HOMER Energy.

HOMER est un outil puissant pour la conception et l'analyse des systèmes de production d'électricité hybrides, composés de groupes électrogènes, de systèmes de cogénération, d'éoliennes, de systèmes photovoltaïques, de systèmes hydrauliques, de batteries, de piles à combustible, de la biomasse et bien d'autres. Que l'installation soit reliée au réseau électrique ou non, HOMER permet de déterminer comment les sources d'énergies intermittentes comme l'éolien et le solaire peuvent être intégrée de manière optimale au sein des systèmes hybrides. [58]. L'espace HOMER se présente comme ainsi :

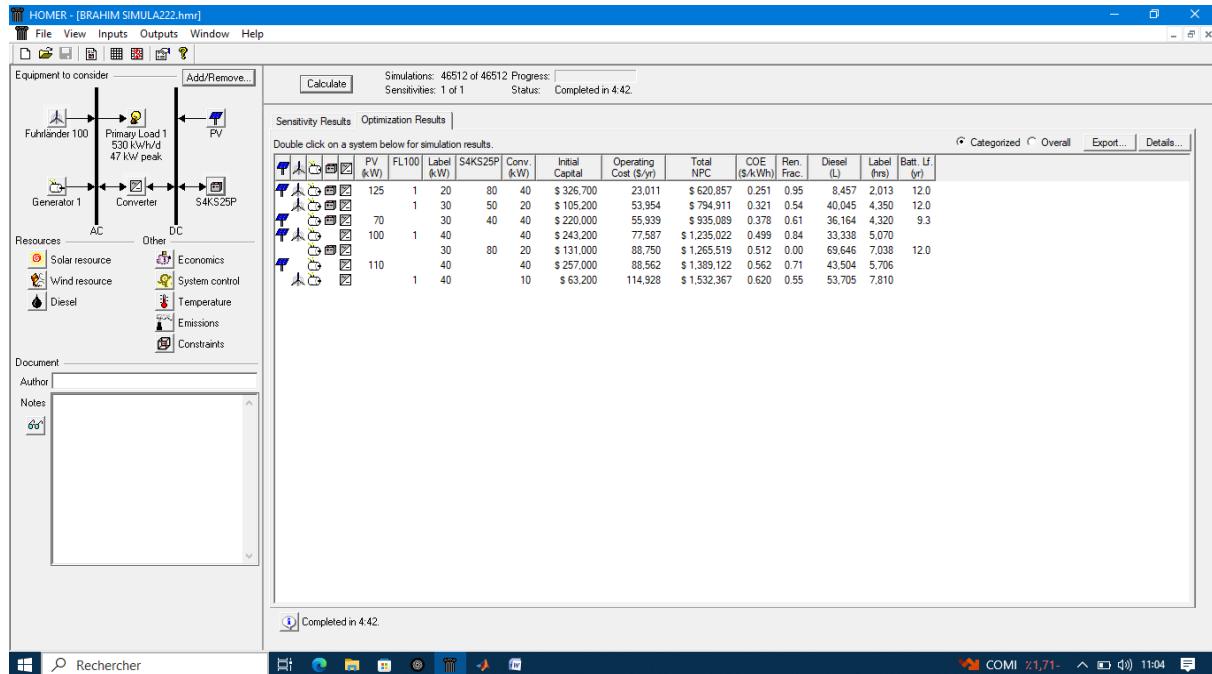


Figure (III.1) : Espace de travail sous HOMER .

III.2.2. Description d'HOMER

Le logiciel calcule et affiche alors les résultats sous forme de tableaux et de graphiques. Il s'utilise selon un processus fréquentatif. Homer s'utilise pour simuler des systèmes de production d'électricité et optimiser l'efficacité et les couts ainsi l'analyse de comportement du système.

Logiciel fonctionne sur une base horaire, la durée de la simulation est établie sur une année.

Tout d'abord Homer est un modèle économique. Il permet à comparer les différentes combinaisons de tailles et de nombres de composants, et d'étudier comment les variations de la disponibilité des ressources affectent le coût d'installation et d'exploitation des différentes solutions de systèmes.

III.3. Source d'énergie :

La sélection des ressources énergétiques est très importante pour la conception d'un système énergétique. Dans notre étude, le système le plus adéquat est composé de trois sources d'énergie solaire, éolienne et un groupe électrogène diesel.

III.3.1. Ressources En Energie Solaire A Timimoun:

Les cellules ou panneaux solaires convertissent directement la lumière du soleil en électricité. Les données moyennes mensuelles sur le rayonnement global proviennent de la NASA (Administration Nationale de l'Espace et de l'Aéronautique). L'indice de clarté, une mesure de la clarté atmosphérique, a

une moyenne de 0,800 pour Timimoun. Le **Tableau III.1** fournit l'indice de netteté et les données de rayonnement quotidien pour Timimoun **Figure (III.3)** [54], [55], [56], [57].

Tableau(III.1) : Irradiation solaire à Timimoun.

Mois	Indice de clarté	Rayonnement quotidien KW/m ² /j
Janvier	0.824	4.900
Février	0.781	5.600
Mars	0.706	6.200
Avril	0.665	6.800
Mai	0.657	7.300
Juin	0.666	7.600
Juillet	0.695	7.800
Août	0.723	7.600
Septembre	0.779	7.200
Octobre	0.839	6.400
Novembre	0.870	5.400
Décembre	0.865	4.800
Moyenne annuelle	0.739	6 ,471

III.3.2 Ressources En Energie Eolienne A Timimoun:

HOMER utilise une interpolation linéaire pour calculer la puissance fournie par l'éolienne en fonction de la vitesse du vent. Les valeurs de vitesses de vent sont récoltées dans la station météorologique à Timimoun est sont mentionnées dans Le **Tableau III.2**.

Tableau(III.2): Vitesse du vent à Timimoun.

Mois	Vitesse de vent (m/s)
Janvier	4.200
Février	4.500
Mars	4.800
Avril	5.000
Mai	5.200
Juin	4.900
Juillet	4.700
Août	4.500
Septembre	4.400
Octobre	4.300
Novembre	4.100
Décembre	4.000
Moyenne annuelle	4.550

III.3.3 Prix du carburant en Algérie (\$ /L) :

Les générateurs diesel, leur inclusion dans un système hybride assure non seulement la continuité de la demande, mais peut être également utilisée pour éviter de surdimensionnés les composants d'énergie renouvelables. Le **Tableau III.3** note le prix du carburant (\$ /L) exprimés en diesel en Algérie [53], [64].

Tableau(III.3) : Prix du carburant. Dollar par litre (\$ / L - DZD /L) [69]

Country	Diesel	
	\$/L	DZD/L
Alegria	0.211	29.010
USA	0.954	128,79
Russia	0.714	96,39
Canada	1.190	160,65
Germany	1.825	246,375
France	1.829	246,915
Japon	1.250	168,75

III.4 SYSTÈME HYBRIDE :

Le système hybride est un système intégré qui utilise des différentes sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne et des générateurs diesel. La configuration du système hybride est illustrée à la (**Figure III.1**). Cette configuration est utilisée pour concevoir un

Système d'énergie hybride photovoltaïque autonome avec L'éolienne et un convertisseur et un générateur Diesel sur la base de la charge maximale.

La configuration optimale du système est déterminée à l'aide des données de ressources annuelles. Dans cette ressource, la période de temps avec le rayonnement solaire et la vitesse de vent et avec un générateur de secours est incluse dans la configuration du système afin de s'adapter à ces situations réelles. Ce générateur de secours alimente la charge en cas d'urgence lorsque l'énergie renouvelable et l'énergie stockée dans la batterie sont insuffisantes pour faire face à la demande de charge.

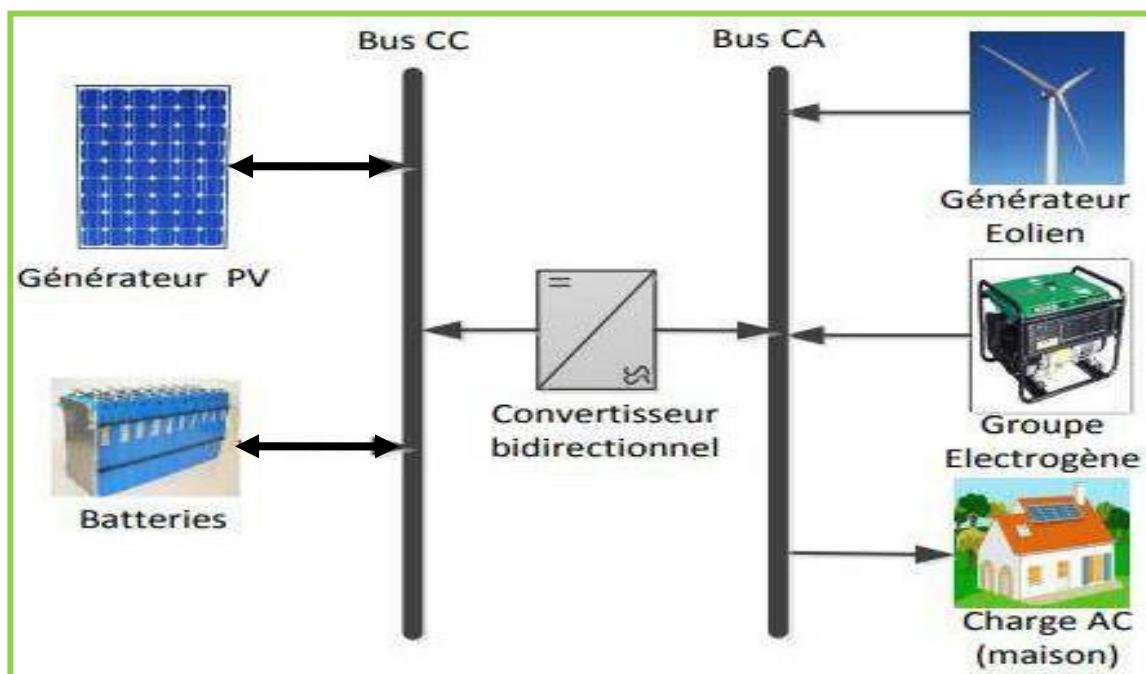


Figure (III.2) : Configuration du système hybride PV /éolienne/ générateur D.

III.5 Description du système de Timimoun :

Nous avons choisi un Site isolé, à la zone sud de l'Algérie (Timimoun) située à 288 m de latitude et dont les coordonnées géographiques sont: latitude: 29 ° 2631 Nord, longitude: et 0 ° 2311 OUEST [55], [56].

III.7 LES DONNÉES :

III.7.1 Charge électrique :

La charge est basée sur une zone rurale comptant 175 foyers. La charge journalière de ce village est de 530 KWh par jour, la charge journalière d'un ménage est de 3.027 KWh par jour et, par conséquent, la charge de système construite par HOMER simule l'alimentation électrique pour une

somme de maisons pouvant atteindre 175 foyers [60], [61], [62]. Le processus de simulation du système hybride choisi a été analysé pour déterminer si l'utilisation du système d'alimentation serait possible ou non. Il est important de noter que ces maisons présentées dans l'exemple d'étude sont isolées et non connectées au réseau. L'objectif supplémentaire était de voir les effets de l'utilisation du système hybride pour leur fournir de l'énergie électrique. Le (**Tableau III.4**) présente le profil de charge d'une maison [59], [60], [63].

Tableau(III.4) : l'estimation des besoins énergétiques journaliers par foyers.

LES COMPOSANTS	La puissance (W)	Temps (h /d)	Consommation (Wh/d)
Chambre adulte	11	4	44
La Chambre des enfants	22	5	110
Salon	22	6	132
Couloir	22	2	44
salle de bains	22	2	44
Toilettes	11	1	11
Cuisine	11	7	77
Réfrigérateur	120	12	1440
Télévision	75	7	525
Ventilateur	100	4	400
Divers	100	2	200
Totale (Wh/d)			3027

III.7.2 Entrée des données Panneau photovoltaïque :

La simulation définie par HOMER pour la recherche du système optimal, prendra en considération les paramètres suivants: ordre de grandeur des coûts : l'investissement [;\$;DZD], le remplacement [;\$;DZD] et les frais des opérations et de maintenances (O & M) [;\$;DZD /an] (**Tableau III.5**). Les modules PV sont fixes, orientés vers le sud et inclinés sous un angle de 36° par rapport à l'horizontale (effet cosinus).

Tableau(III.5): donnée du coût du PV [65].

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/an)
1.000	1500	1200	15

Pour mieux analyser la distribution de la production du générateur photovoltaïque sur l'année, on utilise les puissances mensuelles moyennes développées par ce dernier, données par le (Tableau III.6). Le générateur photovoltaïque a un très bon potentiel le long de l'année. En effet, les puissances moyennes mensuelles maximales sont supérieures à **6.4 kW** durant l'année 2024 à la zone de Timimoun

Tableau (III.6): Puissance moyenne mensuelle du PV.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sept	Oct	Nov	Déc	Moy
P [KW]	4.9	5.6	6.2	6.8	7.3	7.6	7.8	7.6	7.2	6.4	5.4	4.8	6.4

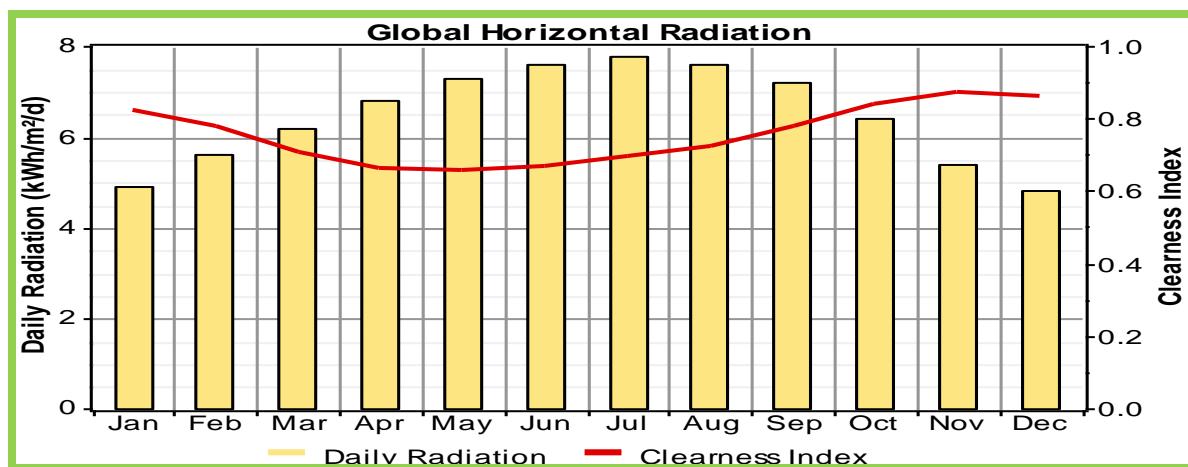


Figure (III.3) : Représentation des puissances mensuelles moyennes du PV.

III.7.3. Entrée des données de l'aérogénérateur

HOMER possède différents types d'éoliennes déjà stockées dans sa bibliothèque de composants. Une fois le type d'éolienne choisi, les propriétés vent s'afficher automatiquement (paramètres techniques) Tableau III.7. Tout comme pour les panneaux solaires, il faut entrer les données des coûts [65].

- Coût capital de cette éolienne [\$/DZD], Tableau III.7.
- Coût de remplacement de cette éolienne [\$/DZD], Tableau III.7.

Coût d'opération et d'entretien des éoliennes [\$/y;DZD/an], Tableau III.7.

Tableau (III.7): Les données du coût de l'aérogénérateur.

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/an)
1.000	1200	1050	0

III.7.4 Entrée des données de la turbine éolienne :

HOMER utilise une interpolation linéaire pour calculer la puissance fournie (Fig.III.3) par l'éolienne en fonction de la vitesse du vent. Les valeurs de vitesses de vent sont récoltées dans la station météorologique à Timimoun.

Tableau(III.8): Valeurs de la puissance de sortie.

	Vitesse du vent V (m/s)	Puissance de sortie (kW)		Vitesse du vent V (m/s)	Puissance de sortie (kW)
01	0.00	0.000	11	12.00	18.890
02	3.00	0.000	12	13.00	19.630
03	4.00	0.370	13	14.00	20.000
04	5.00	0.740	14	15.00	20.000
05	6.00	1.850	15	16.00	19.260
06	7.00	3.700	16	17.00	17.780
07	8.00	6.670	17	18.00	15.930
08	9.00	10.370	18	19.00	14.440
09	10.00	14.070	19	20.00	13.700
10	11.00	17.040	20	24.00	13.330

La loi de puissance obtenue par l'éolienne en fonction de la vitesse du vent est donnée par la **Figure III.3** (le rendement du multiplicateur et celui de la génératrice ne sont pas pris en compte dans cette figure).

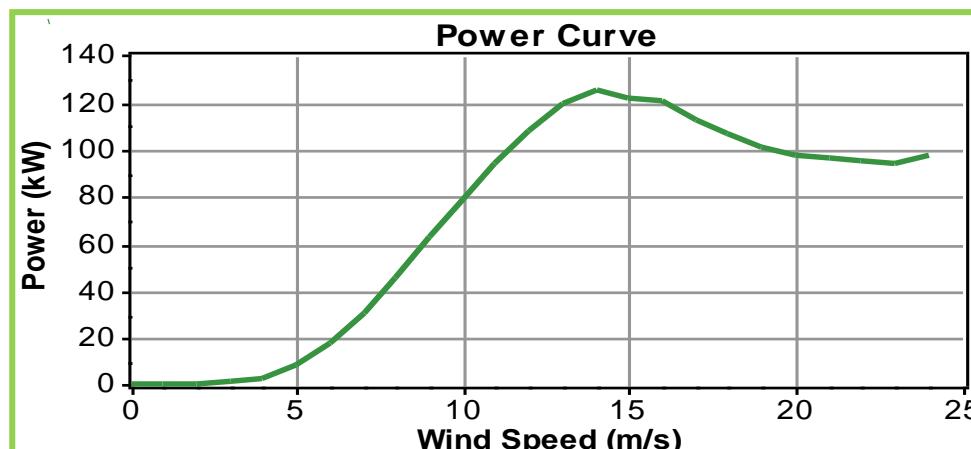


Figure (III.4): Courbe de puissance obtenue en fonction de la vitesse du vent.

La caractéristique de la courbe d'éolienne, donne la courbe de puissance de sortie qui varie avec la vitesse du vent, cette puissance est minimale à 370 W, correspond à une vitesse moyenne de départ de 4 m/s d'après l'enregistrement du (**Figure III.4**).

En effet, il y aura toujours des fluctuations de la vitesse du vent qui rendront impossible une mesure du flux d'air passant à travers le rotor de l'éolienne de façon précise. Dans la pratique, on prendra donc la moyenne des différentes mesures pour chaque vitesse de vent afin de tracer le graphe. On peut distinguer quatre (04) parties sur cette courbe:

- De 0 à la vitesse de démarrage (ici 4 m/s): la puissance de sortie est nulle, le vent n'est pas suffisamment important pour entraîner la rotation du rotor.
- De la vitesse de démarrage à la vitesse nominale (ici 14 m/s): la puissance de sortie augmente jusqu'à atteindre la puissance nominale (ici 20 kW).
- De la vitesse nominale à la vitesse de coupure (ici 25 m/s): la puissance de sortie est maintenue égale à la puissance nominale grâce au dispositif de régulation (C'est un élément essentiel de la survie d'une éolienne, afin d'éviter la destruction de l'aéromoteur lorsque le vent est trop violent) [66].
- Après la vitesse de coupure: l'éolienne est mise à l'arrêt pour protection, la puissance de sortie est nulle.

A l'échelle mensuelle, notre choix s'est porté sur deux mois à rendement contrasté en 2024, Juin et Décembre. En Juin, de la même année, la puissance de l'éolienne varie de 0 à 20 kW avec une vitesse du vent de 0 à 14 m/s voir **Figure III.5.a**. Les valeurs les plus élevées fluctuent au cours de la journée. Juin est considéré comme le mois le plus favorable à rendement et puissance élevés. En Décembre la puissance de l'éolienne varie de 0 à 125 kW avec une vitesse du vent de 0 à 4m/s (**Figure III.4.b**). Les valeurs les plus élevées sont atteintes durant l'après-midi à l'exception de 7 jours sur 31. Décembre est considéré comme le mois le plus défavorable.

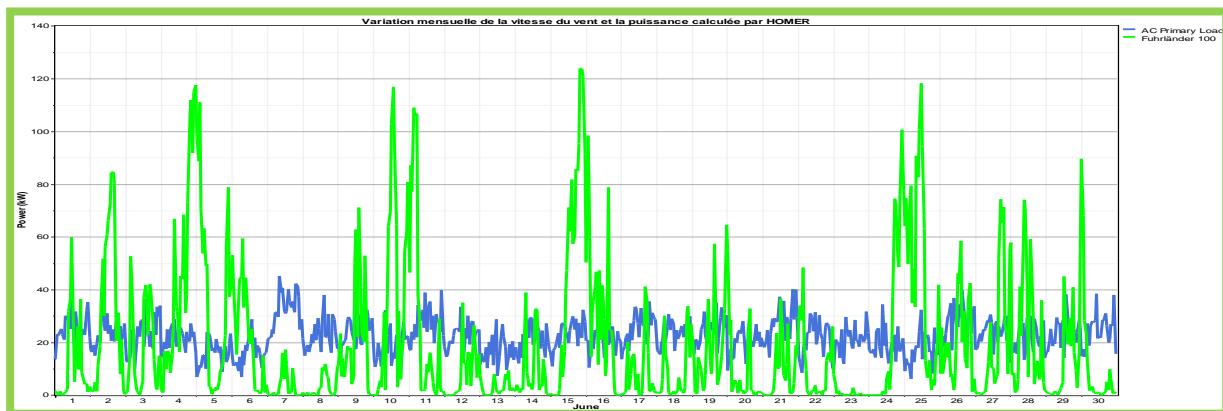


Figure III.5.a Variation mensuelle de la vitesse du vent et la puissance calculée par HOMER (Juin 2024).

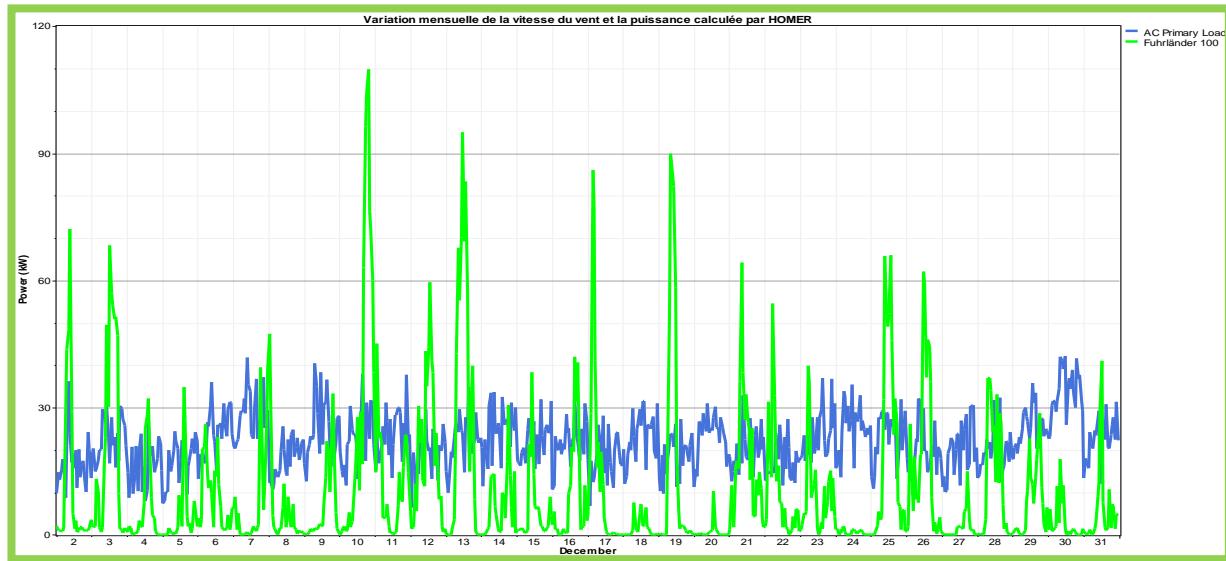


Figure III.5.b. Variation mensuelle de la vitesse du vent et la puissance calculée par HOMER (Décembre 2024).

III.7.5 Simulation d'un générateur diésel

III.7.5.1 Entrée des données d'un générateur diésel

Le coût du GD Tableau III.9 dépend de la taille du GD. Le coût (non subventionné) du diésel est fixé à une valeur de 0,211 \$/L (29 ,01 DZD/L) [67].

Tableau (III.9): Données du coût du GD.

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/an)
1.000	1200	400	0.100

Le GD marche à n'importe quel moment de la journée, de manière idéale c'est-à-dire, capable de fonctionner à charge totale comme à charge partielle et ce, selon la nécessité du site. Le démarrage ou l'arrêt est généralement fonction de l'alimentation de la charge. Dès que les besoins en termes de puissance de cette dernière ne sont pas satisfaits, le parc batteries prend le relais. Lorsque la capacité du parc batteries atteint son seuil bas, il est rechargeé par le groupe électrogène comme illustré dans la (Figure III.6).



Figure III.6 : Puissance journalier du GD.

A partir de courbe ci-dessous (Figure III.6), on remarque d'après le profil des puissances journalières moyennes du générateur diesel, que pour les mois de JUIN, les potentiels renouvelables solaires peuvent satisfaire la demande. Ces puissances journalières sont faiblement délivrées au cours des mois de Janvier. Pour les mois qui restent, le profil est dynamique, avec la même allure pour ces mois, mais à des valeurs différentes. Le GD est donc utilisé pour combler le manque en électricité et pour recharger les batteries.

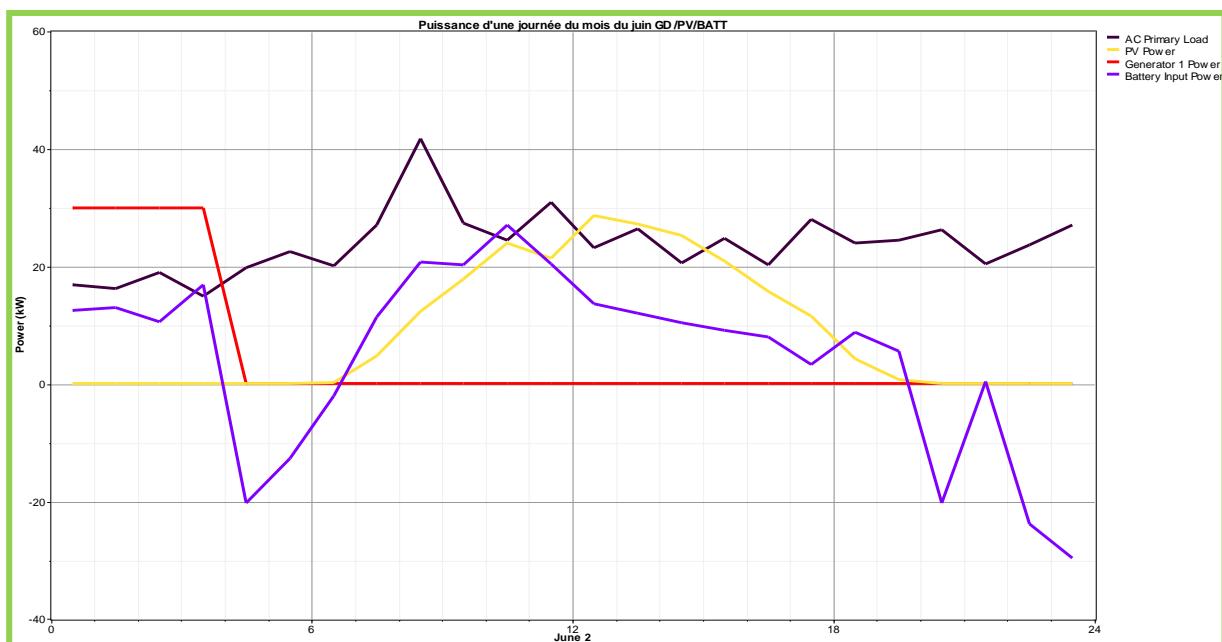


Figure (III.7) : Puissance d'une journée du mois du juin GD /PV/BATT.

III.7.6 Simulation du système de stockage

III.7.6.1 Entrée des données du système de stockage

Nous avons choisi la technologie plomb-acide de type Hoppecke 16 OPzS 2000 **Figure III.8** pour des raisons de coût et de fiabilité. Ce type de batteries n'a pratiquement pas besoin d'entretien et il est bien commode pour les pics de puissance. Ainsi, les coûts récurrents ne concernent que le remplacement. Toutefois, étant donnée la nature imprévisible des sources, il est très difficile d'estimer leur durée de vie. D'après le type de batterie choisi, le remplacement s'effectue tous les 15 à 20 ans [65].



Figure(III.8) : Batteries Hop-picker 16 OPzS 2000 [68].

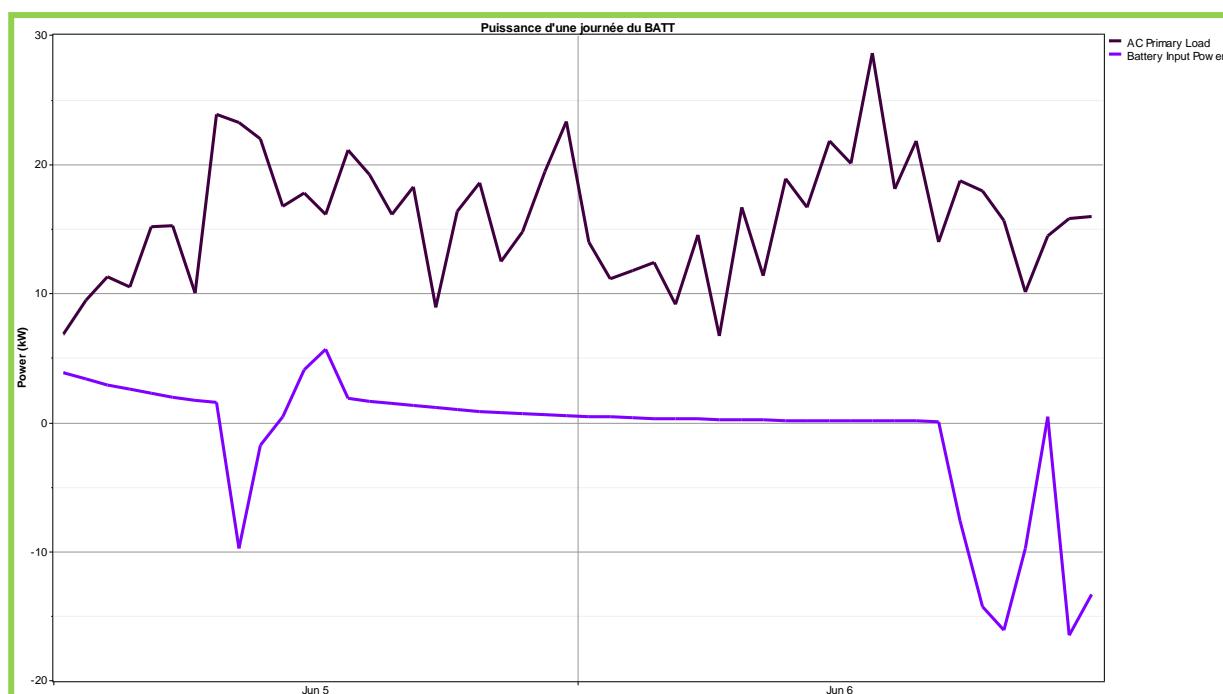
La simulation définie par HOMER pour la recherche du système optimal, prendra en considération les paramètres suivants: ordre de grandeur des coûts (investissement [\$/DZD], remplacement [\$/DZD] et les frais d'opération et maintenance O & M [\$/DZD /an] **Tableau III.10**.

Tableau(III.10) : Coût de la batterie [58].

Quantité [kW]	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/an)
1.000	276	276	20

III.7.6.2 Evolution de l'état de charge des batteries

Il est important de signaler que l'énergie stockée est utilisée pour assurer les besoins énergétiques du site afin de minimiser la consommation du combustible comme le montre la **Figure III.9** pendant la nuit, les batteries fonctionne en décharge et l'état de charge est assuré par le solaire et éolienne dans les heures de la journée sauf en cas consécutifs d'ensoleillement et vent exceptionnellement faible .



Figure(III.9) : batteries fonctionne en décharge et l'état de charge .

La variation de l'ensoleillement moyen et de la vitesse du vent en fonction de la période de l'année, résulte en un cyclage saisonnier. Ce dernier peut parfois conduire à des périodes prolongées de charge basse de la batterie, quand les capteurs photovoltaïques et éoliens n'arrivent pas à recharger complètement la batterie.

III.7.7 Simulation du système de conversion

III.7.7.1 Entrée des données du convertisseur bidirectionnel

La simulation définie par HOMER pour la recherche du système optimal dépend de la puissance délivrée par le convertisseur bidirectionnel. Elle prendra en considération les paramètres suivants [65]:

- Coût initial [\$/DZD], **Tableau III.10**.
- Coût de remplacement [\$/DZD], **Tableau III.10**.

Coût de fonctionnement et maintenance [\$/an ; DZD/an].

Tableau (III.11): Les données du coût du convertisseur.

Taille [kW]	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/an)
1.000	546	546	7

On introduit ensuite les propriétés du convertisseur: la durée de vie et le rendement en mode onduleur, la capacité à fonctionner en même temps que le groupe électrogène, la capacité à fonctionner en mode redresseur et le rendement en mode redresseur (**Figure III.10**).

Inverter inputs

Lifetime (years) {..}

Efficiency (%) {..}

Inverter can operate simultaneously with an AC generator

Rectifier inputs

Capacity relative to inverter (%) {..}

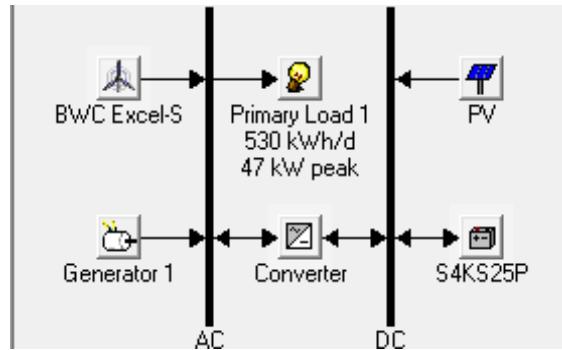
Efficiency (%) {..}

Figure(III.10): Fonctionnement du convertisseur en mode onduleur/redresseur.

Pour générer suffisamment de puissance, des convertisseurs sont nécessaires. L'efficacité de conversion de l'inverseur et du redresseur est supposée être de 90% et la durée de vie du convertisseur de 15 ans. Le dimensionnement du convertisseur est considéré comme compris entre 0 kW et 170 kW à un intervalle de 10 kW, tandis que le rapport de conversion relatif du courant alternatif et du courant continu est de 100%.

III.8 Analyse du système et simulations :

L'optimisation hybride est utilisée pour la conception de systèmes d'alimentation électrique autonomes utilisant une combinaison de panneaux photovoltaïques, Eolienne /générateur D pour produire de l'électricité. (**Figure III.10**). Le processus de simulation a été modifié de différentes tailles de panneaux photovoltaïques, d'éoliennes, de convertisseurs de puissance et de batteries .Apres plusieurs simulations on sélectionne le système le plus faible est économique.



Figure(III.11) : Configuration du système hybride PV /Eolienne/ générateur D.

III.8.1 Détails des composants

Les éléments constitutifs d'un système énergétique sont les modules photovoltaïques, les Eoliennes, les générateurs D, les batteries et les convertisseurs de puissance. Cette étude développe une combinaison appropriée de paramètres clés, tels que la puissance du panneau photovoltaïque, les éoliennes le stockage de la batterie et la capacité du convertisseur, pour correspondre à une charge prédefinie. Pour l'analyse économique, les coûts ont été pris en compte dans des conditions simulées, y compris le capital initial, les coûts de remplacement et les coûts d'exploitation et d'entretien.

Tous les paramètres sont indiqués dans le (Tableau .III.12).

Tableau (III.12): Les paramètres des différents éléments.

Sys Energétique	Paramètres	Valeur	Unité
PV module	Capacité nominale	1	KW
	Coût initiale	1500	\$
	Coût de remplacement	1200	\$
	Coût d'exploitation et d'entretien	15	\$/ans
	la durée de vie	20	Ans
Eolienne	Coût en capital	1200	\$
	Coût de remplacement	1050	\$
	Coût d'exploitation et d'entretien	0.2	\$/h
	la durée de vie	1300	H
Batteries	Coût en capital	900	\$
	Coût de remplacement	900	\$
	Coût d'exploitation et d'entretien	9	\$/ans
	Autonomie minimale de la batterie	8	ans
	Capacity nominal	1000	h
Convertisseur	Coût en capital	1000	\$
	Coût de remplacement	1000	\$
	Coût d'exploitation et d'entretien	10	\$/ans
	la durée de vie	15	ans
	Capacité relative à l'onduleur	100	%
Générateur Diesel	Coût en capital	1300	\$
	Coût de remplacement	1100	\$
	Coût d'exploitation et d'entretien	0.25	\$/h
	la durée de vie	13000	H

III.8.2. Simulation

Les études économiques ont été réalisées sur le logiciel HOMER, cela nous a permis de comparer les contraintes financières et techniques d'utilisation de différents systèmes. HOMER est un logiciel développé par l'US National Renewable Energy Laboratory. Cette application est utilisée pour concevoir des systèmes électriques hors réseau et connectés au réseau et les évaluer techniquement et financièrement. Pour la production et la distribution d'énergie dans des systèmes autonomes. Il vous permet d'envisager un grand nombre d'options technologiques, en tenant compte de la disponibilité des ressources énergétiques et d'autres variables.

III.8.3. Système optimal

Les configurations obtenues sont évaluée sur la durée de vie du projet estimée à 25 ans. Elles sont sélectionnées en fonction de leur faisabilité, du coût d'installation.

Les résultats de la simulation sont présentés dans le (**Tableau .III.11**). Et la figure (4a.4b).

1/ Système hybride solaire- Eolienne -générateur D avec batteries : Nous avons constaté que le coût le plus bas en énergie (0,306 \$/kWh) avec un cout total (NPC) plus faible qu'est égal à (757,289 \$) a été observé avec la configuration du system 1, et un minimum de CO2 (52,067kg / an) est produit dans ce système.

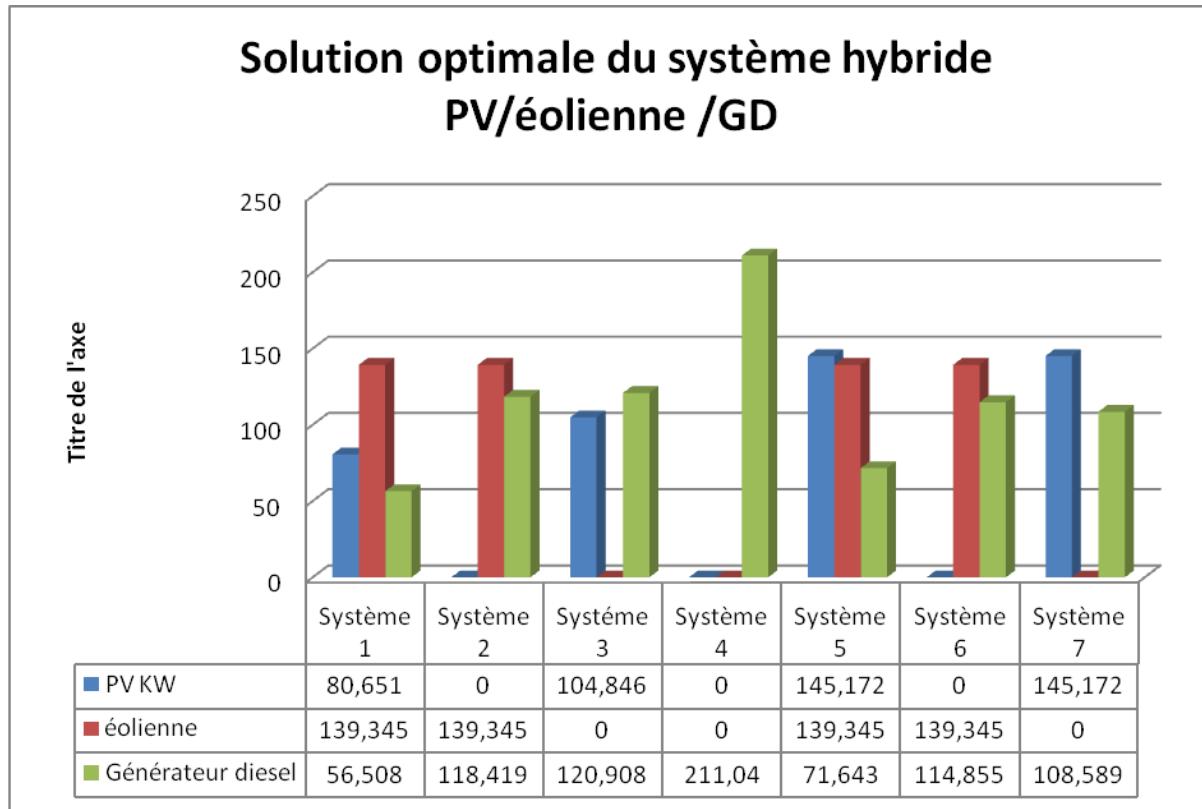
2/ Système hybride solaire -générateur D : Le coût énergétique le plus élevé (0,705 \$/kWh) avec un cout total (NPC) plus grand qu'est égal à (1,741 ,433 \$) a été observé avec le système hybride solaire - générateur D. Et le maximum de CO2 (129,773 kg/an) est produit dans ce système 7.

Le système hybride (system1) solaire- éolienne- batteries-GD avec batterie optimisé est plus rentable en termes de coût actuel net (NPC) et de coût énergétique (COE).

III.8.3.1 Configuration optimale du système hybride solaire éolienne générateur diesel :

Tableau(III.13) : solution optimale système hybride d'énergie solaire éolienne générateur diesel.

	Configuration	PV KW	éolienne	Générateur diesel	Initial Capital\$	Total NPC \$	COE (\$kW/h)
Système1	PV + éolienne + GD+ batteries	80,651	139,345	56,508	310,2	757,289	0.306
Système2	éolienne + GD+ batterie	0	139,345	118,419	105,2	794,908	0.321
Système3	PV + GD+ batterie	104,846	0	120,908	310	1, 113,707	0.450
Système4	Générateur D+ batterie	0	0	211,04	131	1,265,519	0.512
Système5	PV + éolienne + GD	145,172	139,345	71,643	363,2	1,499,360	0.606
Système6	éolienne + GD	0	139,345	114,855	63,2	1,532,365	0.620
Système7	PV + GD	145,172	0	108,589	362	1,743,433	0.705



Figure(III.12) : Solution optimale du système hybride PV/éolienne /GD.

III.8.3.2 Production d'électricité

La production d'énergie au cours d'une année est détaillée dans le tableau (III.14) et figure (III.13). Dans le tableau Les systèmes de production montrent une participation significative de la source photovoltaïque / éolienne / générateur D/batterie.

Tableau(III.14): Énergie annuelle produite

Production	System 1 kWh/ans	System 2 kWh/ans	System 3 kWh/ans	System 4 kWh/ans	System 5 kWh/ans	System 6 kWh/ans	System 7 kWh/ans
Photovoltaïque	80,651	0	104,846	0	145,172	0	145,172
Eolienne	139,345	139,345	0	0	139,345	139,345	0
Générateur	56,508	118,419	120,908	211,04	71,643	114,855	108,589
Surplus d'électricité	276,504	257,764	225,754	211,04	356,16	254,2	253,761
Charges électriques non satisfaites	0	0	0	0	0	0	0

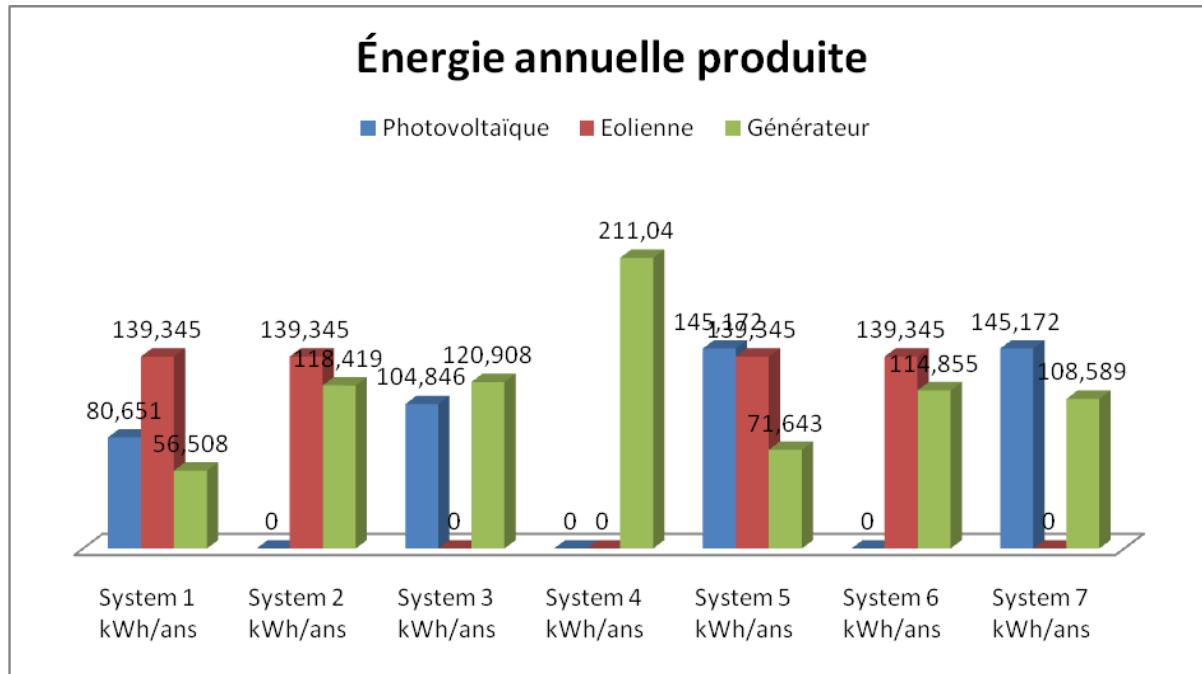


Figure (III.13) : La production d'énergie au cours d'une année pour tout les system.

III.8.3.3 Analyse environnementale :

Tableau III.15 et **Figure III.14** Résume les émissions totales de polluants dans les configurations examinées. À partir de ce **Tableau III.15**, le système le moins polluant est le system 1. Il est possible de réduire considérablement les émissions de polluants en intégrant un générateur fonctionnant au gaz butane. Selon les résultats, les émissions de polluants peuvent être réduites d'environ 60% par rapport à l'utilisation d'un générateur diesel dans le système hybride, en particulier les émissions de CO2 et de CO responsables des polluants atmosphériques et de l'environnement.

Tableau (III.15): Emission de polluants atmosphériques.

mission d'air polluants(kg/an)	System 1	System 2	System 3	System 4	System 5	System 6	System 7
Gaz carbonique	52,067	105,45	109,585	183,401	95,187	141,423	129,773
Monoxyde de carbone	129	260	270	453	235	349	320
Hydrocarbures imbrûlés	14	29	30	50	26	39	35
Matière particulaire	10	20	20	34	18	26	24
Le dioxyde de soufre	105	212	220	368	191	284	261
Oxydes d'azote	1,147	2,323	2,414	4,039	2,097	3,115	2,858

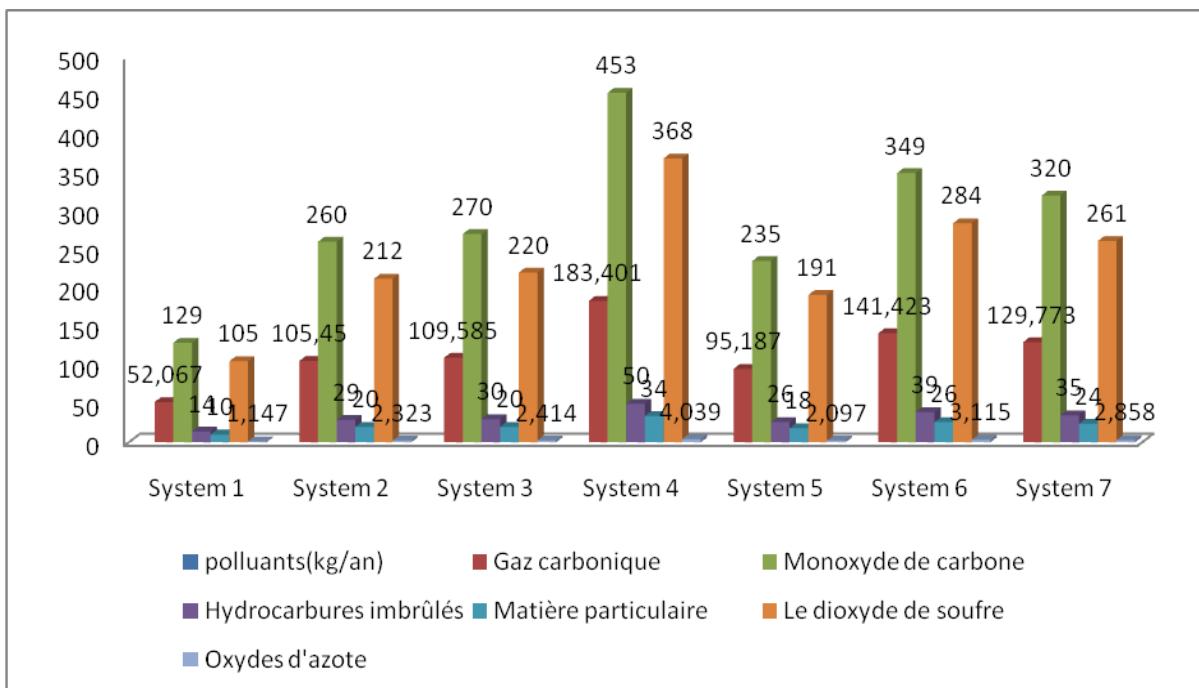


Figure (III.14) : Emission de polluants atmosphérique.

La production d'énergie pendant une journée dans les deux mois Janvier et juil pour le système hybride (système 1) solaire – éolienne –générateur D + batterie et le système hybride (système 7) solaire -générateur D est montrées dans les quatre figures qui suivent figure(III.15), figure(III.16), figure (III.17) et figure (III.18)

Système 1 hybride solaire – éolienne –générateur D+ batterie : le meilleur système

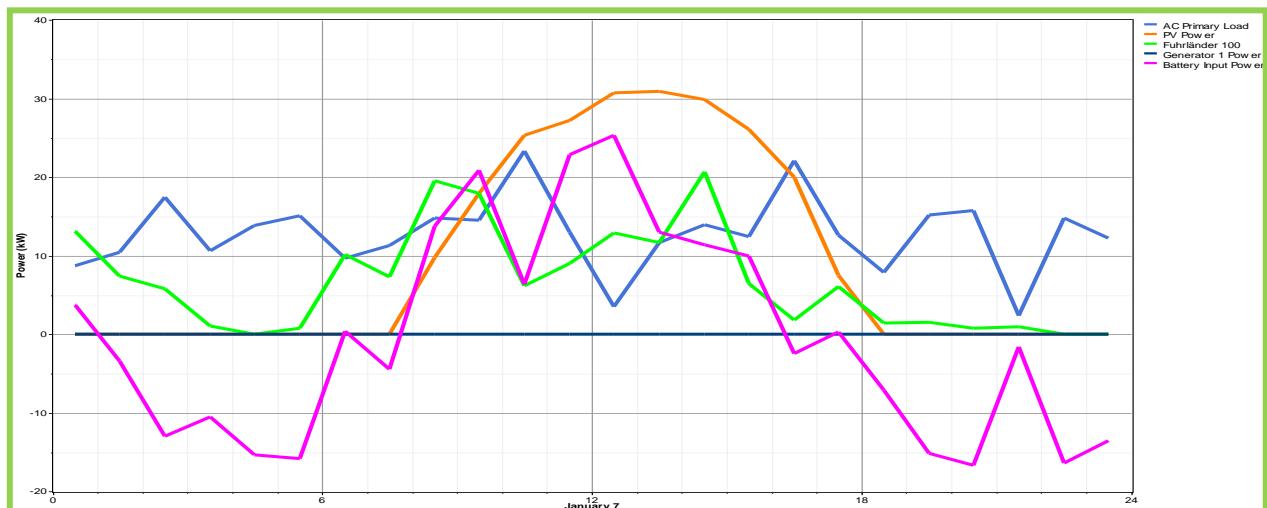


Figure (III.15) : Production d'énergie pendant une journée dans mois janvier.

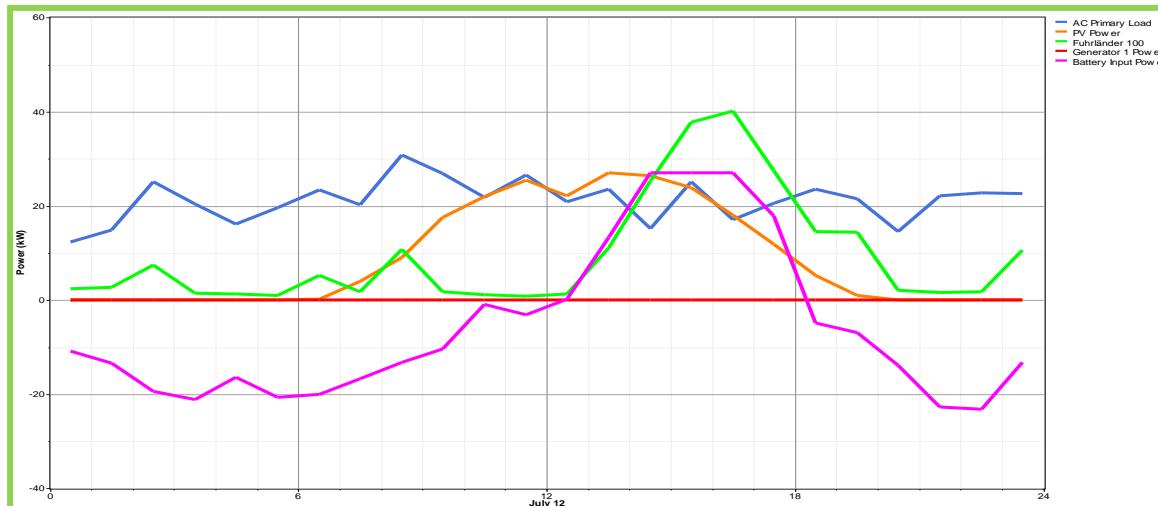


Figure (III.16) : Production d'énergie pendant une journée dans mois juil.

Système 7 hybride générateur D - Batterie : le movie système



Figure (III.17) : Production d'énergie pendant une journée dans mois Janvier.

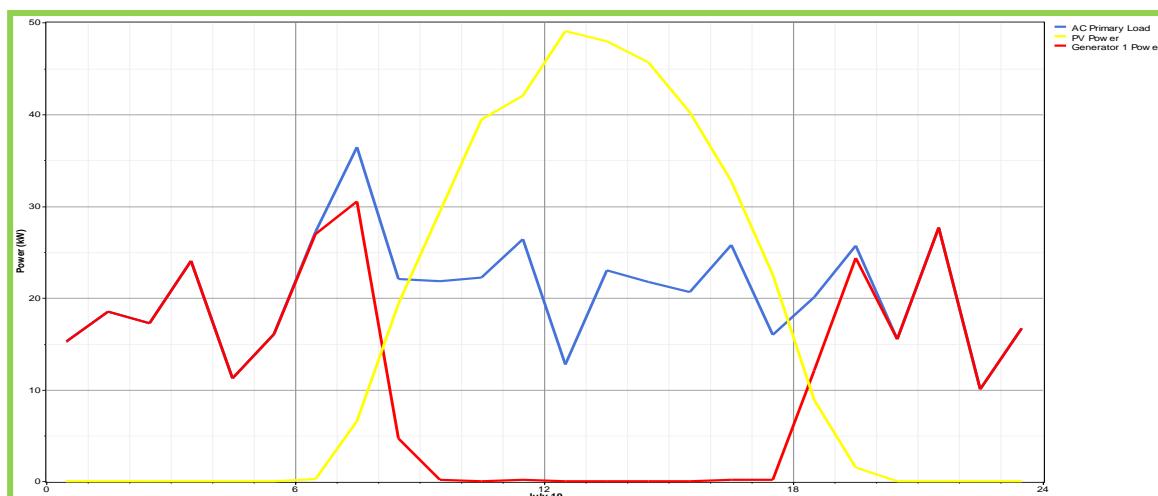


Figure (III.18): Production d'énergie pendant une journée dans mois Juil.

III.9 CONCLUSION

Les configurations obtenues sont sélectionnées en fonction de leur faisabilité et du coût d'installation. La rentabilité de l'opération est évaluée sur une durée de vie du projet estimée à 25 ans. Et il a été constaté que le coût énergétique le plus bas (0.306 \$ / kWh) avec le plus bas NPC (757,289 \$) a été observé avec le système hybride solaire- éolienne –GD + batterie. Le coût énergétique le plus élevé (0.705 \$ / kWh) et le NPC le plus élevé (1, 743,433 \$) ont été observés avec le système hybride solaire- et générateur D . Le taux de production de CO2 augmente de (129,773 kg/an) avec le système hybride solaire et générateur et une production minimale de CO2 avec le système hybride solaire - éolienne –GD + batterie, et une quantité minimale de CO2 (52,067 kg/an) est produite dans ce système. En ce qui concerne la production de CO2 et la demande de charge future, le système hybride solaire - éolienne –GD + batterie optimisé est plus rentable en termes de coût actuel net (NPC) et de coût énergétique (COE) en termes de génération de CO2 et de demande de charge future.

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude relative a la simulation et a l'optimisation d'un système hybride PV/EOLIENNE/ générateur D /Batterie par logiciel HOMER et nous conclu que le choix idéal système hybride (PV /EOLIENNE/GD/Batterie) puisque ce dernier est le moins couteux et polluant.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans cette étude, une analyse approfondie a été menée afin d'évaluer la faisabilité technico-économique d'un système énergétique hybride autonome combinant des sources renouvelables (solaire et éolienne) à un générateur diesel et un système de stockage par batteries. Pour ce faire, une simulation a été réalisée à l'aide du logiciel HOMER, en intégrant les données météorologiques, les caractéristiques techniques des composants, ainsi que le profil de charge d'un site isolé.

Le système proposé est constitué de 100 kW de panneaux photovoltaïques, une éolienne Fuhrländer 100, un générateur diesel de 30 kW, 100 batteries Surrette 4KS25P, et un convertisseur (inverter/rectifier) de 30 kW. Ce système utilise la stratégie de gestion par Cycle Charging, optimisée pour maximiser la contribution des énergies renouvelables et réduire la consommation de carburant.

Les résultats obtenus montrent que le système est capable de répondre à une demande annuelle de 193 445 kWh, avec un taux de satisfaction de charge de près de 100 % (5,21 kWh/an de charge non satisfaite). L'énergie produite est assurée à 79,6 % par des sources renouvelables (29 % solaire, 50 % éolien), ce qui limite le recours au diesel à 20 % de la production totale. Le coût actualisé de l'énergie (LCOE) est estimé à 0,306 \$/kWh, et le coût total actualisé du système (NPC) est de 757 289 \$, ce qui reste compétitif pour un site hors réseau.

Le système permet également une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre avec 52 067 kg de CO₂/an, tout en évitant une consommation excessive de carburant fossile grâce à un fonctionnement optimisé du générateur (2 352 heures/an, 19 772 litres de diesel consommés).

En conclusion, ce système hybride PV/Éolien/Diesel avec batteries constitue une solution durable et techniquement fiable pour alimenter un site isolé en énergie électrique, en alliant performance énergétique, économies à long terme, et bénéfices environnementaux.

Perspectives

Les résultats obtenus ouvrent la voie à plusieurs perspectives d'amélioration :

- **Optimisation avancée :** L'intégration d'un module automatisé de dimensionnement multi-sources avec une interface conviviale permettrait de simplifier et d'accélérer le processus de conception pour les utilisateurs non spécialistes.
- **Analyse de sensibilité élargie :** L'utilisation systématique du module de sensibilité d'HOMER permettrait de mieux cerner l'impact des incertitudes (prix du diesel, évolution du rendement, durée de vie des batteries...) sur la rentabilité du système.
- **Approche environnementale renforcée :** L'ajout de contraintes ou de pénalités liées aux émissions de CO₂, conformément aux futures réglementations environnementales algériennes, améliorerait l'évaluation écologique du système.
- **Comparaison logicielle :** Il serait pertinent de confronter les résultats de HOMER avec ceux d'autres outils de simulation comme Matlab/Simulink, afin de valider la robustesse du modèle développé et d'explorer d'autres méthodes de commande ou de gestion énergétique.

Référence

- [1] Chang, L. (2002). Systèmes de conversion de l'énergie éolienne. IEEE canadian review,1 - 5.
- [2] Niass, M. (2022). Etude et modélisation d'un système hybride PV/Eolien/GE : impacts de la température et de la pression.
- [3]. J. Canard, Impact de la génération d'énergie dispersée dans les réseaux de distribution" thèse doctorat, Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, 2012.
- [4]. H. Kanchev, "Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable" Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain Hal Id école centrale de Lille , 2015
- [5].<http://fr.wikipedia.org/>
- [6]. O. Gergaud, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, 2002.
- [7].<https://www.cea.fr/comprendre/Pages/matiere-univers/essentiel-sur-le-soleil.aspx>
- [8] Mohamed Amjahdi et Jean Lemale<>Dunod ; paris, 2011
- [9]. <https://opera-energie.com/energie-solaire/>
- [10] : ANNE LABOURET, MICHEL VILLOZ « énergie solaire photovoltaïque »,2e édition, DUNOD
- [11]. <https://energieplus-lesite.be/wp-content/uploads/2020/02/cellules-photovoltaïques-rendement-bon-1024x538.jpg>
- [12]. Ferrah Billel, "Etude d'un système Hybride (photovoltaïque –éolien)", Mémoire de master, Université de Annaba, 2015.
- [13]. <http://physique.unice.fr/sem6/2011-2012/PagesWeb/PT/Cellule/silicium.html>
- [15]. <https://www.artyseo.fr/type-panneau-solaire/>
- [16]. <https://solaire-france.com/cellules-solaires/>
- [16]. <https://www.lamaisonsaintgobain.fr/guides-travaux/renovation-energetique-habitat-durable/fonctionnement-d-un-panneau-solaire-notre-guide-complet>
- [17]. <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaïques>
- [18]. <https://misterprepa.net/wp-content/uploads/2024/12/energies-png-1024x576.webp>
- [19]. <https://www.pv-magazine.fr/2023/04/19/240-gw-de-nouvelles-capacites-solaires-installees-dans-le-monde-en-2022/>

- [20]. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/60/Algeria_GHI_Solar-resource-map_lang-FR_GlobalSolarAtlas_World-Bank-Esmap-Solargis.png
- [21]. H. De Battista, R. J. Mantz, and C. F. Christiansen, "Dynamic sliding mode power control of wind driven induction generators," *IEEE Trans.Energy Convers.*, vol. 15, no. 4, pp. 451– 457, Dec. 2000.
- [22]. C. Nichita, D. Luca, "Large Band Simulation of the Wind Speed for Real Time Wind Turbine Simulator", *IEEE Trans Energy. Conv.*, vol.17, n°4, pp.523 - 529, December 2002.
- [23]. Mr DEKKICHE Mohamed«MODELISATION ET SIMULATION D'UN SYSTEME HYBRIDE AUTONOME (PV /EOLIENNE/DIESEL) POUR ALIMENTER UN SITE ISOLE A CHLEF, ALGERIE en2017
- [25]. Ludmil STOYANOV. Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergies renouvelables. *Energie électrique*. UNIVERSITE PASCAL PAOLI, 2011. Français.
- [26].https://www.researchgate.net/figure/Configuration-dun-SEH-a-bus-CC-32_fig3_352544933
- [27] M. H. Nehrir, C.Wang, K. Strunz, H.Aki, A Review of Hybrid Renewable/Alternative Energy Systems for Electric Power Generation : Configurations, Control, and Applications, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 2, no. 4, 392-403, 2011.
- [28].YOUCEF IMEN DEHANI AMINA Etude et simulation d'un système hybride à base d'énergies renouvelables (photovoltaïque –éolien) 2021Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
- [29].Fartas Hafsa « étude, modélisation et simulation d'un système hybride autonome éolienphotovoltaïque » Mémoire de Master de l'université Badji Mokhtar Annaba ; 2019.
- [30].<https://bucket.theses-algerie.com/files/repositories-dz/1180380114614875.pdf>
- [31]. P. Bajpai, V. Dash, Hybrid renewable energy systems for power generation in standalone application: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no.5, pp.2926-2939, 2012.
- [32] NAAM Abdellahak Falkou Mostafa «Étude et optimisation du système (éolien / PV/Diesel) Hybride autonome pour les zones rurales de la région de l'Adrar en 2022
- [34]. https://www.researchgate.net/figure/Systeme-hybride-PV-Diesel-parallele-Ce-systeme-possede-deux-ameliorations-par-rapport-aux_fig11_228990921
- [35].BELKAOUSSAAMEL&MAMOUNKHADRA Commande Intelligente d'un système hybride pour la production d'énergie électrique2023 Université d'Oran 2 Mohamed ben Ahmed
- [36] Djemai Mohammed Ramzi Sais Mohamed Ikba. Etude d'un système hybride « éolienne photovoltaïque» en 2023 UNIVERSITEKASDIMERBAHOUARGLA
- [37] BORNI ABDELHALIM, Etude et optimisation d'un multi système hybride de conversion d'énergie électrique, Modélisation et commande des machines électrique, UNIVERSITE CONSTANTINE 1, 2015.

- [38] B. ISSAM «Représentations des systèmes hybrides à énergie renouvelables mémoire de master Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen 2022
- [39]. G. Séguier et F. Labrique. "Les Convertisseur de L'électronique de Puissance, et Comportement Dynamique", Tome5, Technique et documentation –Lavoisier, 1998.
- [40] <https://eolienneshop.com/blogs/blog-eolienne/les-differents-types-de-oliennes>
- [41] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/toutsur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-une-eolienne>
- [42] <https://www.wekiwi.fr/post/energie-eolienne-definition-avantages-et-inconvénients>
- [43] <https://eolmienne.com/pourquoi-eoliennes-tournent-pas-toujours/>
- [44] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/toutsur-l-energie/produire-de-l-electricite/les-differents-types-d-eoliennes>
- [45] <https://bit.ly/3VuVARy>
- [46] <https://eoliennessite.wordpress.com/les-differents-types-de-olienne/>
- [47] Bahri .D et Hadejemi. H «Etude technique et économique d'un projet d'hybridation d'un réseau électrique isolé du sud par l'intégration de 3MW en Photovoltaïque (Projet de centrale hybride de Tin-Zaouatine) » 2020 Université Saâd Dahlab, Blida-1.
- [48] GUERROUT N Et GOUAREH A «Simulation d'une cellule solaire en couches minces à base de Sb₂(Se_{1-x}S_x)₃» 2021 université KASDI MERBAH OUARGLA
- [49] BENHIDA M «Etude d'un système hybride turbine à gaz générateur éolien connecté au réseau électrique d'Adrar» 2017 UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR.
- [50] BOUTELLI H «Etude d'un système hybride à sources d'énergie renouvelables dans la région de Ouargla : Application au pompage de l'eau» 2023 université KASDI MERBAH OUARGLA.TOUNSI [50] TOUNSI Oussama LASKRI Zakaria
- [51] ACHOURI. M. cherif «Modélisation d'un panneau solaire photovoltaïque» <http://dspace.univ-badjia.mokhtar-annaba.dz/bitstream/123456789/11593/4/9-chapitre%20II.pdf>
- [52] <http://dspace.univ-tiaret.dz/bitstream/123456789/11593/4/9-chapitre%20II.pdf>
- [53] www.Global Petrol Prices.com Economic indicators for over 200 countries.
- [54] Sonelgaz Direction Générale du Développement et de la Stratégie. Statistiques Globales sur les réalisations en Production et Consommation Direction analyse & Prévisions. 2007,
- [55] Sonelgaz Dalil. Direction de la Comptabilité et du Contrôle de Gestion. Electricity and Gas National Enterprise, Alger, Algérie, 2007.
- [56] Centre de la technologie de l'énergie de CANMET. Ressources naturelles Canada RETScreen International. Modèle RETScreen pour projets de petite centrale hydroélectrique, Canada, 2004, 30-123.

- [57] Hamouda M Saïdi, A Louchene, C Hamouda et A Malek. Etude et réalisation d'un système intelligent d'alimentation en énergie électrique d'une habitation en milieu urbain avec injection dans le réseau. *Revue des Energies Renouvelables.*, 2011, 14(2): 187 -202.
- [58] AEGPL Association Européenne. *Beyond the Gas Grid An LPG Industry Roadmap.* 2011, pp 25-30.
- [59] Google map of Algeria. *Satellite Images of Algeria.* 2016, maplandia.com.
- [60] D saheb koussa, M belhamel, k benferhat. Contribution a l'étude theorique du Comportement d'un systeme hybride (eolien- photovoltaïque- diesel) de production d'electricite sans interruption. *Afrique science*, 2009, (05), 23 – 38.
- [61] Deepak Kumar Lal, Bibhuti Bhushan Dash, A. K. Akella. Optimization of PV/Wind/Micro-Hydro/Diesel Hybrid Power System in HOMER for the Study Area. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 2011, (3), 307- 325.
- [62] S Bahramara, M Parsa Moghaddam, M R Haghifam. Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER A review. *elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, (62), 609–620
- [63] Nima Izadyar, Hwai Chyuan Ong, Wen Tong Chong, Juwel Chandra Mojumder, K Y Leong. Investigation of potential hybrid renewable energy at various rural areas in Malaysia. *Elsevier Journal of Cleaner Production*, 2016, (139), 61-73.
- [64] Bruno Calan, Thierry Genthalon, M L Jain. LP.Gas Markets - Guidelines for LP.Gas Use in Rural Energisation. *World LP Gas Association*, 2002, 25-30.
- [65] www.groupe-soprec.com.
- [66] eolienne.f4jr.org/ système de régulation et de protection.
- [67] www.energy.gov.dz.
- [68] <http://www.solaire.energies autonomes. Com138.html>.
- [69] https://ppac.gov.in/prices/international-prices-of-diesel?utm_source=chatgpt.com

ANNEXE 1

RAPORT DE SIMULATION HOMER

Sensitivity case

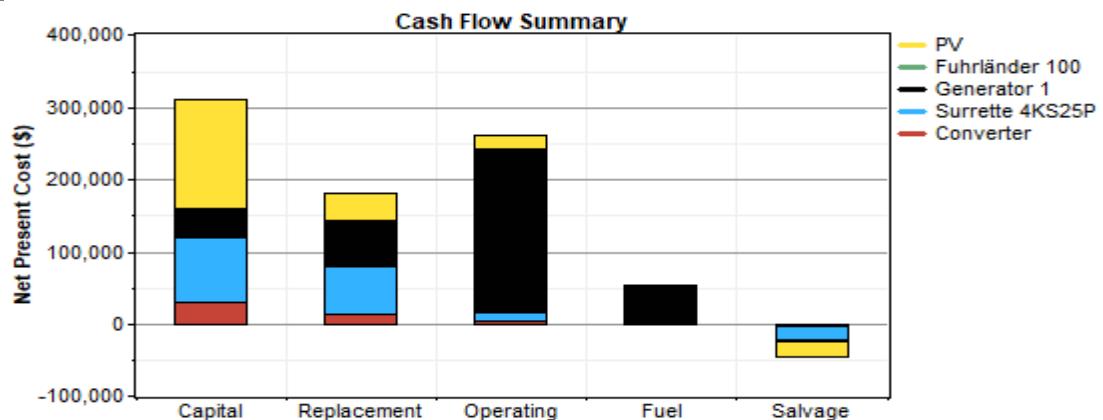
PV Derating Factor: 30 %

System architecture

PV Array	100 kW
Wind turbine	1 Fuhrländer 100
Generator 1	30 kW
Battery	100 Surrette 4KS25P
Inverter	30 kW
Rectifier	30 kW
Dispatch strategy	Cycle Charging

Cost summary

Total net present cost	\$ 757,289
Levelized cost of energy	\$ 0.306/kWh
Operating cost	\$ 34,974/yr

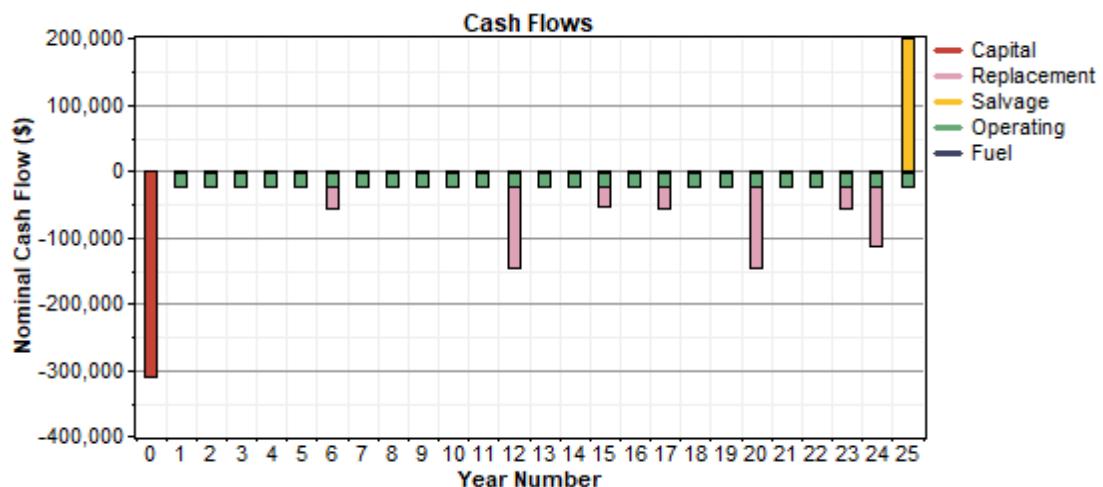


Net Present Costs

Component	Capital	Replacement	O&M	Fuel	Salvage	Total
	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)
PV	150,000	37,417	19,175	0	-20,970	185,622
Fuhrländer 100	1,200	327	0	0	-183	1,344
Generator 1	39,000	62,900	225,499	53,331	-3,667	377,062
Surrette 4KS25P	90,000	66,955	11,505	0	-19,222	149,238
Converter	30,000	12,518	3,835	0	-2,330	44,023
System	310,200	180,117	260,014	53,331	-46,373	757,289

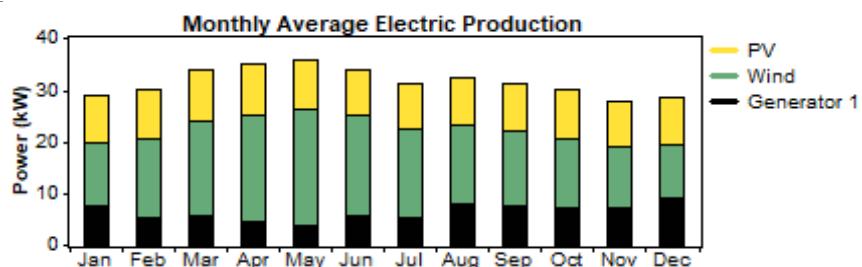
Annualized Costs

Component	Capital	Replacement	O&M	Fuel	Salvage	Total
	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)
PV	11,734	2,927	1,500	0	-1,640	14,521
Fuhrländer 100	94	26	0	0	-14	105
Generator 1	3,051	4,920	17,640	4,172	-287	29,496
Surrette 4KS25P	7,040	5,238	900	0	-1,504	11,674
Converter	2,347	979	300	0	-182	3,444
System	24,266	14,090	20,340	4,172	-3,628	59,240



Electrical

Component	Production	Fraction
	(kWh/yr)	
PV array	80,651	29%
Wind turbine	139,345	50%
Generator 1	56,508	20%
Total	276,504	100%

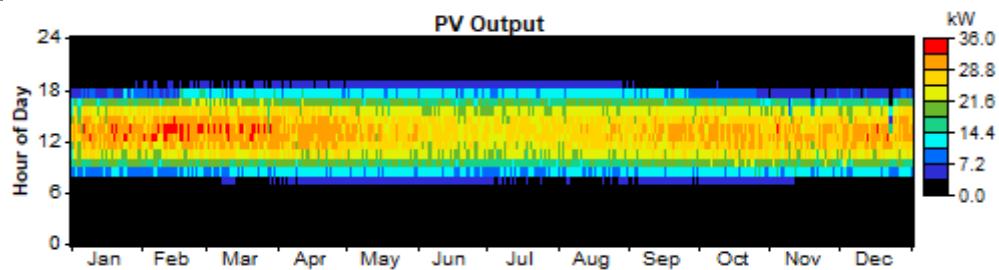


Load	Consumption	Fraction
	(kWh/yr)	
AC primary load	193,445	100%
Total	193,445	100%

PV

Quantity	Value	Units
Rated capacity	100	kW
Mean output	9.21	kW
Mean output	221	kWh/d
Capacity factor	9.21	%
Total production	80,651	kWh/yr

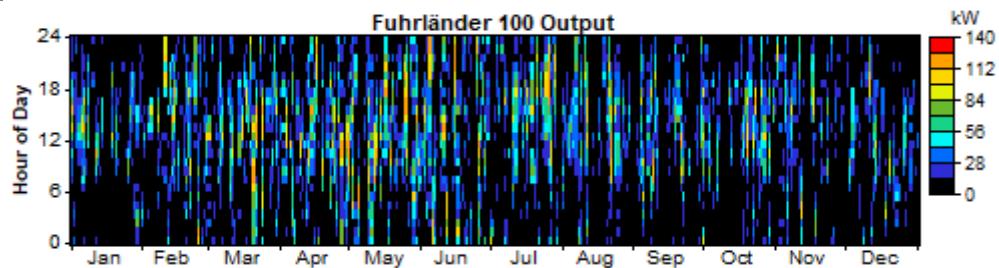
Quantity	Value	Units
Minimum output	0.00	kW
Maximum output	33.7	kW
PV penetration	41.7	%
Hours of operation	4,383	hr/yr
Levelized cost	0.180	\$/kWh



AC Wind Turbine: Fuhrländer 100

Variable	Value	Units
Total rated capacity	100	kW
Mean output	15.9	kW
Capacity factor	15.9	%
Total production	139,345	kWh/yr

Variable	Value	Units
Minimum output	0.00	kW
Maximum output	125	kW
Wind penetration	72.0	%
Hours of operation	7,620	hr/yr
Levelized cost	0.000754	\$/kWh

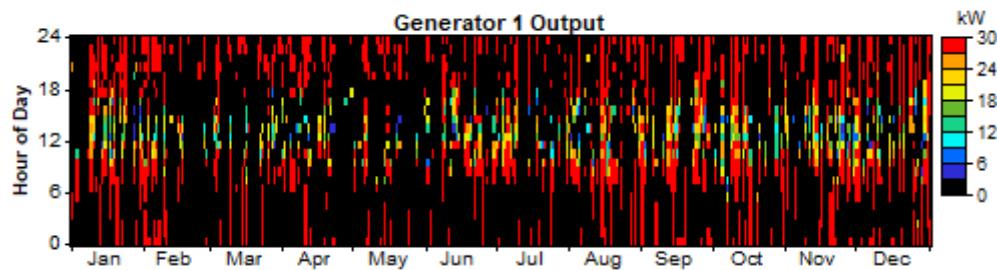


Generator 1

Quantity	Value	Units
Hours of operation	2,352	hr/yr
Number of starts	434	starts/yr
Operational life	5.53	yr
Capacity factor	21.5	%
Fixed generation cost	10.5	\$/hr
Marginal generation cost	0.0527	\$/kWh yr

Quantity	Value	Units
Electrical production	56,508	kWh/yr
Mean electrical output	24.0	kW
Min. electrical output	0.105	kW
Max. electrical output	30.0	kW

Quantity	Value	Units
Fuel consumption	19,772	L/yr
Specific fuel consumption	0.350	L/kWh
Fuel energy input	194,558	kWh/yr
Mean electrical efficiency	29.0	%

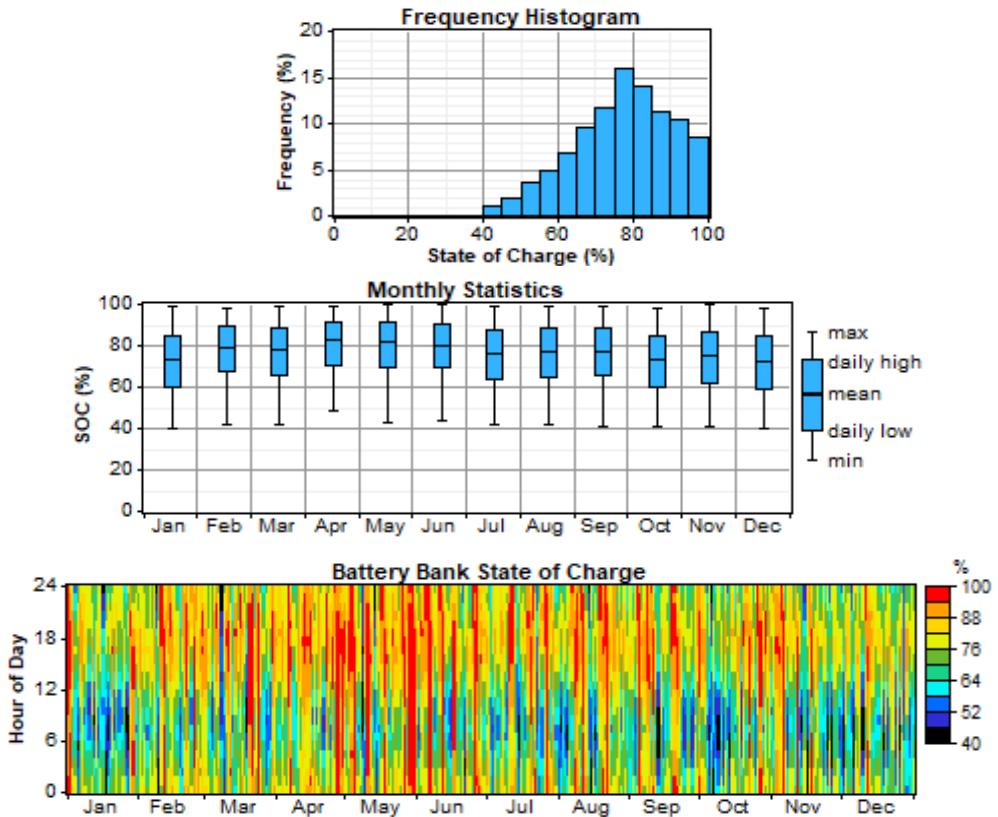


Battery

Quantity	Value
String size	1
Strings in parallel	100
Batteries	100
Bus voltage (V)	4

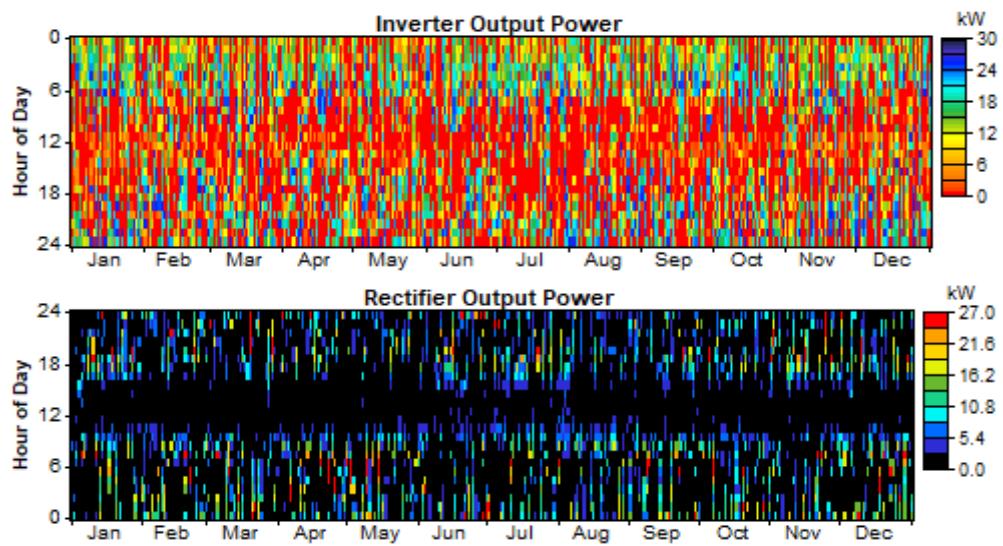
Quantity	Value	Units
Nominal capacity	760	kWh
Usable nominal capacity	456	kWh
Autonomy	20.6	hr
Lifetime throughput	1,056,860	kWh
Battery wear cost	0.095	\$/kWh

Average energy cost	0.024	\$/kWh
Quantity	Value	Units
Energy in	71,239	kWh/yr
Energy out	57,158	kWh/yr
Storage depletion	187	kWh/yr
Losses	13,894	kWh/yr
Annual throughput	63,904	kWh/yr
Expected life	12.0	yr



Converter

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Capacity	30.0	30.0	kW
Mean output	8.0	2.4	kW
Minimum output	0.0	0.0	kW
Maximum output	27.2	27.0	kW
Capacity factor	26.7	8.1	%
Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Hours of operation	5,067	2,954	hrs/yr
Energy in	77,981	25,026	kWh/yr
Energy out	70,183	21,272	kWh/yr
Losses	7,798	3,754	kWh/yr



Emissions

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	52,067
Carbon monoxide	129
Unburned hydrocarbons	14.2
Particulate matter	9.69
Sulfur dioxide	105
Nitrogen oxides	1,147

Les ressource solar et éolienne à la zone de Timimoun (2024)

1. Ressource Solaire

Mois	Irradiation (kWh/m ² /jour)	Température Moyenne (°C)
Janvier	4.9	14
Février	5.6	17
Mars	6.2	22
Avril	6.8	27
Mai	7.3	32
Juin	7.6	37
Juillet	7.8	41
Août	7.6	40
Septembre	7.2	35
Octobre	6.4	29
Novembre	5.4	22
Décembre	4.8	16

2. Ressource Éolienne

Mois	Vitesse Moyenne (m/s)
Janvier	4.2
Février	4.5
Mars	4.8
Avril	5.0
Mai	5.2
Juin	4.9
Juillet	4.7
Août	4.5
Septembre	4.4
Octobre	4.3
Novembre	4.1
Décembre	4.0

MERCIE