

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES  
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Energie et environnement

Présenté par : MILOUDI Asmaa

KHELOUFI Fedoua Chemss El Houda

Thème

**Etude de solutions photovoltaïques des  
infrastructures portuaire de SIDI OUCHAA**

Soutenu publiquement, le 25/ 06/2023, devant le jury compos de :

Mme. BENAHMED Nadia	Professeur	ESSA Tlemcen	Présidente
Mme. FARADJI Djamila	MCA	ESSA Tlemcen	Directrice de mémoire
Née KHERBOUCHE			
Mr. GHOMRI Amina	Professeur	ESSA Tlemcen	CO directeur de mémoire
Mme. BOUSMAHA Imene	MCA	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
Mr. MEGNAFI Hichem	MCA	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2022 /2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

A decorative floral element with several small flowers and leaves, positioned at the top left of the calligraphic text.

# *Remerciement*

En guise de reconnaissance, je tiens à témoigner mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de mon stage de fin d'étude et à l'élaboration de ce modeste travail.

Mes sincères gratitude à FARADJI Djamila et GHOMRI Amina pour la qualité de son enseignement, ses conseils et son intérêt incontestable qu'elles portent à tous les étudiants.

Notre reconnaissance s'adresse également aux membres du jury, à savoir Madame Nadia BENAHMED, Madame Imene Souhila BOUSMHA et Monsieur Hichem MEGHNAFI, pour l'attention soutenue qu'ils ont portée à ce travail. Nous témoignons aussi toute notre gratitude envers tout le personnel de l'Ecole Supérieur en Science Appliqué de Tlemcen qui veille à assurer une formation de qualité aux étudiants

Je tiens à remercier l'ensemble du personnel de La Société de Gestion des Ports de Pêche pour leur patience, leurs conseils pleins de sens et pour le suivi et l'intérêt qu'ils ont portaient à mes travaux.

Dans l'impossibilité de citer tous les noms, nos sincères remerciements vont à tous ceux et celles, qui de près ou de loin, ont permis par leurs conseils et leurs compétences la réalisation de ce mémoire

Enfin, je n'oserais oublier de remercier tout le corps professoral de l'école supérieure en science appliquées ESSAT pour le travail énorme qu'il effectue pour nous créer les conditions les plus favorables pour le déroulement de nos études.

# ***Dédicace***

*Je remercie tout d'abord Allah, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé le courage et la patience nécessaires pour accomplir ce travail malgré les difficultés rencontrées.*

## **Mon père**

*Je dédie ce travail à mon père **MILOUDI Djilali**, qui m'a toujours soutenu dans mes efforts vers la réussite, que ce soit dans les études ou dans les défis de la vie. Il est la source d'inspiration et de force qui me pousse à persévérer et à tendre vers le succès. Lorsque j'aurai obtenu mon diplôme de premier cycle, j'espère avoir exaucé votre souhait.*

*Votre amour et votre soutien resteront à jamais dans mon cœur. Je t'offre ce travail, cher père, dans l'espoir que tu te sentiras fier de moi.*

## **Ma mère**

*Je dédie ce travail à ma mère **MILOUDI Fatima**, grâce à qui j'ai étudié et réalisé mes rêves. Elle m'a encouragé tout le temps et m'a donné tout ce dont j'avais besoin sans refuser une demande. Je t'aime maman et j'espère que tu es fière de moi, et j'espère que ma réussite est le fruit de tes efforts qui n'ont pas été vains.*

## **Mes frères**

*Je dédie ce travail à mes frères **Abderrahmane** et **Younes**. Vous avez été mes piliers et ma source de soutien constant. Votre présence et vos encouragements m'ont donné la force de persévérer et de réaliser mes objectifs. Merci d'être là pour moi et de partager cette belle aventure.*

## **Mes amies**

*Je dédie ce travail à **mes amies**, en particulier à **mes amies de la résidence universitaire**. Vous avez été de formidables compagnes et amies tout au long de cette période d'études. Merci pour votre soutien et vos encouragements constants, ainsi que pour les moments merveilleux que nous avons passés ensemble. Je nous souhaite à tout un avenir rempli de réussite et de bonheur.*

**MILOUDI Asmaa**

# *Dédicace*

*A Allah Tout puissant*

*Qui m'a inspiré*

*Qui m'a guidé dans le bon chemin*

*Je vous dois ce que je suis devenue*

*A L'âme de mon grand - père chéri, Kheloufi Lhadj Larbi Que ce travail soit le témoignage de mes pensées indéfectibles à ta mémoire. Puisse Dieu le tout puissant, t'accueille dans Son Eternel Paradis. Que Dieu te bénisse.*

*A ma grande mère, Meymti, Que dieu te protège*

*A mes très chers parents*

*Ce modeste travail est le fruit de tous sacrifices déployés pour notre éducation. Vous avez toujours souhaité le meilleur pour nous. Vous avez fourni beaucoup d'efforts aussi bien physiques que moraux à notre égard. Je vous adore. Puisse ALLAH m'aider pour rendre un peu soit - il de ce que vous m'avez donné .*

*A mes sœurs A mes nièces IBTIHEL et AFNANE et mes neveux WASSIM, BARAA et ANES vous préserve de tout mal, vous protège et t'accorde tout ce que vous désirez .*

*A toute la famille KHELOUFI*

*En témoignage de ma gratitude et de mon affection la plus sincère, je vous dédie ce travail. Que dieu vous protège et vous procure bonheur, santé et prospérité.*

*A mes très chères amies*

*Rajaa, Batita, Fatima ,Souhila ,Asma ,Bouchra, Rizlen ,Najwa , Yousra , Sihem, Hadjer ,Ikram et Nour Je dédie ce travail à toutes nos préparations , les jours et les nuits blanches , nos larmes et nos fous rires , nos déceptions et nos éclats de joie . A tous les moments qu'on a passés ensemble .A notre belle amitié. A tous les moments agréables, inoubliables que nous avons vécus ensemble, Que dieu vous comble de bonheur et vous protège. A tous ceux dont l'oubli du nom n'est pas celui du cœur.*

*KHELOUFI Fedwa Chemss El Houda*

## Résumé

Les systèmes hybrides de production d'électricité autonomes, combinant le photovoltaïque et le diesel, représentent une solution idéale pour répondre aux besoins énergétiques. Ainsi, ils offrent une solution pour assurer une alimentation électrique stable et durable, dans les régions isolées ou les zones en développement.

Le présent travail vise à proposer une configuration d'un système hybride de production d'énergie principalement basé sur des sources renouvelables, en vue d'atteindre l'autonomie énergétique. Ce système étudié consiste en des panneaux photovoltaïques couplés à un groupe électrogène, avec des batteries de stockage. Son objectif principal est de répondre à la demande électrique nécessaire à l'alimentation des infrastructures du port de SIDI Ouchaa.

Afin d'évaluer les performances énergétiques du système étudié, des simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel HOMER. Les résultats obtenus ont permis de déterminer dans quelle mesure le système était capable de répondre à la demande énergétique du port, en assurant une alimentation électrique adéquate et fiable.

**Mots Clé : énergie renouvelable, système hybride, panneau photovoltaïque, groupe diesel.**

## Abstract

Stand-alone hybrid power generation systems, combining photovoltaic and diesel, represent an ideal solution to meet energy needs. Thus, they offer a solution to ensure a stable and sustainable power supply, in isolated regions or developing areas.

This work aims to propose a configuration of a hybrid energy production system mainly based on renewable sources, in order to achieve energy autonomy.

This envisaged system consists of photovoltaic panels coupled to a generator, with storage batteries. Its main objective is to meet the electrical demand necessary to supply the infrastructures of the port of SIDI Ouchaa.

In order to evaluate the energy performance of the system, simulations were carried out using the HOMER software. The results obtained determined the extent to which the system was able to meet the energy demand of the port, ensuring an adequate and reliable power supply.

**Key Words: renewable energy, hybrid system, photovoltaic panel, diesel group.**

## ملخص

تمثل أنظمة توليد الطاقة الهجينة المستقلة ، التي تجمع بين الخلايا الكهروضوئية والديزل ، حلاً مستداماً في السياقات التي قد يكون فيها الوصول إلى شبكات الطاقة التقليدية محدوداً أو غير موثوق به ، مثل المناطق النائية أو المناطق النامية يهدف هذا العمل إلى اقتراح تكوين نظام إنتاج طاقة هجين يعتمد بشكل أساسي على المصادر المتجددة، من أجل تحقيق استقلالية الطاقة. يتكون هذا النظام المدروس من ألواح كهروضوئية مقترنة بمولد ديزل مع بطاريات تخزين. هدفها الرئيسي هو تلبية الطلب على الكهرباء اللازمة لتزويد البنية التحتية لميناء سيدي يوشع من أجل تقييم أداء الطاقة للنظام المدروس، تم إجراء عمليات المحاكاة باستخدام برنامج Homer pro . أتاحت النتائج التي تم الحصول عليها تحديد مدى قدرة النظام على تلبية الطلب على الطاقة في الميناء ، من خلال ضمان إمداد طاقة مناسب وموثوق، تتيح هذه الأنظمة إمكانية استغلال الطاقات المتجددة بشكل مستقل وفعال ، مع توفير مصدر موثوق ومستمر للطاقة ، وبالتالي فإنها توفر حلاً لضمان مصدر طاقة مستقر الكلمات المفتاحية الطاقة الشمسية ، النظام الهجين ، ألواح شمسية ، مولد ديزل.

# Table de Matière

## Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur le système d'énergie hybride .....	3
I.2 Système d'énergie hybride.....	3
I.2.1 Définition .....	3
I.2.2 But d'un système hybride PV/GE.....	3
I.3 Conception et fonctionnement des systèmes hybrides PV/GE /batteries.....	4
I.3.1 Les principaux organes du système hybride .....	4
I.3.1.1 Générateur photovoltaïque.....	5
I.3.1.1.1 Les cellules photovoltaïques .....	5
I.3.1.1.2 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque .....	5
<b>I.3.1.1.1.1 Caractéristique courant-tension .....</b>	<b>5</b>
<b>I.3.1.1.1.2 Efficacité .....</b>	<b>6</b>
<b>I.3.1.1.1.3 Température de fonctionnement .....</b>	<b>7</b>
I.3.1.1.3 Principe de fonctionnement.....	7
I.3.1.1.4 Les technologies des cellules photovoltaïques.....	7
<b>I.3.1.1.4.1 Silicium monocristallin.....</b>	<b>8</b>
<b>I.3.1.1.4.2 Silicium polycristallin .....</b>	<b>8</b>
<b>I.3.1.1.4.3 Silicium amorphe .....</b>	<b>8</b>
I.3.1.1.5 Module photovoltaïque .....	8
I.3.1.1.6 Caractéristiques d'un module.....	9
I.3.1.2 Générateur diesel.....	10

# Table de Matière

I.3.1.2.1 Les composantes d'un générateur diesel.....	11
<b>I.3.1.2.1.1 Moteur diesel.....</b>	<b>11</b>
<b>I.3.1.2.1.2 Alternateur .....</b>	<b>11</b>
<b>I.3.1.2.1.3 L'armoire de contrôle.....</b>	<b>12</b>
I.3.1.2.2 Les classes de puissance.....	12
I.3.1.2.3 Classes d'application.....	13
I.3.1.3 Systèmes de stockage.....	13
I.3.1.3.1 Définition d'une batterie .....	14
I.3.1.3.2 Rôle d'une batterie .....	14
I.3.1.3.3 Caractéristiques d'une batterie.....	15
I.3.1.3.4 Les types de batterie solaire .....	16
<b>I.3.1.3.4.1 Batteries au plomb-acide.....</b>	<b>16</b>
<b>I.3.1.3.4.2 Batteries AGM .....</b>	<b>17</b>
<b>I.3.1.3.4.3 Batteries au lithium-ion.....</b>	<b>17</b>
<b>I.3.1.3.4.4 Batteries au Nickel Cadmium .....</b>	<b>18</b>
I.3.1.4 Système de régulation .....	19
I.3.1.5. Les convertisseurs .....	19
I.3.1.6 Système de supervision.....	20
I.3.1.7 Les charge .....	20
I.4 Différentes configurations du système hybride.....	20
I.4.1 Configuration PV/Diesel série .....	20
I.4.2 Configuration PV/Diesel parallèle .....	21
I.4.3 Configuration PV/Diesel commutée .....	22

# Table de Matière

I.5 Classification des systèmes hybrides .....	23
Conclusion.....	24
Chapitre II: Dimensionnement du système hybride PV/DIESEL .....	26
II.1 L'objectif général.....	26
II.2 Dimensionnement technico-économique.....	27
II.2.1 Présentation du site et caractéristiques de la charge .....	27
II.2.1.1 L'emplacement du système hybride .....	27
II.2.1.2 Evaluation de la consommation.....	28
II.2.1.3 Estimation de l'ensoleillement sur le site de l'installation du générateur PV.....	30
II.2.1.4 L'angle d'inclinaison optimale pour le panneau.....	30
II.2.2 Présentation du système.....	30
II.2.2.1 Stratégie de fonctionnement .....	30
II.2.2.2 Système à couplage CC/AC.....	31
II.2.2.3 Système à couplage AC .....	32
II.2.3 Dimensionnement du système de génération photovoltaïque.....	32
II.2.3.1 Puissance crête.....	33
II.2.3.2 Nombre de panneaux .....	34
II.2.3.2.1 Nombre de panneaux en série.....	34
II.2.3.2.2 Nombre de panneaux en parallèle.....	34
II.2.3.3 La taille de la surface du champ photovoltaïque .....	34
II.2.3.4 La tension de fonctionnement du champ photovoltaïque .....	35
II.2.4 Dimensionnement de générateur diesel .....	35
II.2.5 Système de stockage .....	36

# Table de Matière

II.2.5.1 Energie et capacité de stockage .....	36
II.2.5.2 Nombre de batterie .....	37
II.2.5.2.1 Nombre de batteries en série.....	37
II.2.5.2.2. Nombre de batteries en parallèle.....	37
II.2.6 Régulateur.....	38
II.2.7 Convertisseurs.....	38
II.2.8 Les câbles.....	39
II.2.8.1 La longueur.....	39
II.2.8.2 La section.....	39
II.2.8.3 Connecteur.....	39
II.2.8.4 Résistivité .....	40
Conclusion.....	40
Chapitre III : Simulation du système par HOMER Pro.....	42
III.1 Présentation du logiciel .....	42
III. 1 Géographie et climat Description du cas étudié .....	43
III.2 Simulation du système.....	43
III. 3 Profil de charge .....	44
III.4 Évaluation des ressources et collecte de données.....	46
III.4.1 Ressources solaire .....	46
III.4.2 Température ambiante.....	47
III.4.3 Donnée sur le carburant Diesel .....	48
III.5 Modélisation du système sous le logiciel HOMER.....	48
III.5.1 Modélisation de panneaux solaires photovoltaïques .....	49

# Table de Matière

III.5.2 Modélisation de batteries solaires .....	49
III.5.3 Modélisation de convertisseur.....	50
III.5.4 Modélisation du GE.....	51
III.6 Résultats et interprétations .....	51
III.6.1 Les solutions données par HOMER pro.....	52
III.6.2 La production PV et la consommation du système .....	53
III.6.3 Résultat de convertisseur.....	54
III.6.4 Résultat sur les batteries.....	55
III.7.4 Résultats du champ PV.....	56
III.6.6 Résultats sur GE .....	57
III.6.7 Résultats sur les émissions .....	58
Conclusion.....	58
Conclusion générale .....	61
Bibliographie.....	63

# Table de figures

## Table des figures

Figure I. 1 : Système hybride PV-diesel .....	4
Figure I. 2 : La courbe courant-tension d'une cellule PV [6] .....	6
Figure I. 3 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV [7].....	7
Figure I. 4: Les technologies des cellules photovoltaïques .....	8
Figure I. 5: Schématique d'un alternateur.....	11
Figure I. 6: État de charge et profondeur de décharge d'une batterie .....	15
Figure I. 7: batterie solaire au plomb-acide .....	17
Figure I. 8: batterie solaire lithium-ion.....	18
Figure I. 9 :batterie solaire au NiCd.....	19
Figure I. 10: Configuration PV/Diesel série.....	21
Figure I. 11: Configuration PV/Diesel parallèle.....	22
Figure I. 12:Configuration PV/Diesel commutée.....	23
Figure II. 1:Carte satellite SIDI OUCHAA .....	28
Figure II. 2:Vue par Google Earth.....	28
Figure II. 3:Caractéristiques du LED choisi.....	29
Figure II. 4: Architecture à deux bus CC/AC [23] .....	32
Figure II. 5: Architecture à couplage AC [1].....	32
Figure III. 1:Vue de SIDI OUCHAA par Google Earth.....	43
Figure III. 2: Écran d'accueil HOMER Pro .....	44
Figure III. 3:Profil de charge saisie dans HOMER Pro.....	44
Figure III. 4: Profil de charge annuelle .....	45
Figure III. 5:Profil de charge journalier suivant les saisons .....	45

## Table de Figures

Figure III. 6: L'irradiation quotidienne dans la zone étudiée (port de SIDNA YOUCHAA).....	46
Figure III. 7: la température ambiante moyenne mensuelle du site.....	47
Figure III. 8: carburant disponible dans le modèle.....	48
Figure III. 9: schéma du système hybride PV-diesel simulé par HOMER Pro .....	49
Figure III. 10: caractéristiques de module solaires photovoltaïques .....	49
Figure III. 11: Batterie choisie parmi les modèles de HOMER Pro .....	50
Figure III. 12: Convertisseur choisie parmi les modèles de HOMER Pro .....	51
Figure III. 13: Paramètres réseau introduit dans le modèle de HOMER Pro .....	51
Figure III. 14: le nombre de solutions simulé par HOMER Pro .....	52
Figure III. 15: Les solutions les plus optimales.....	53
Figure III. 16: la production électrique totale mensuelle .....	53
Figure III. 17: Energie électrique produite par le système .....	54
Figure III. 18: Puissance de l'onduleur .....	55
Figure III. 19: état de charge moyenne journalière et mensuelle des batteries.....	56
Figure III. 20: Puissance journalière moyenne délivrée par les générateurs PV .....	57
Figure III. 21: Indication puissance de réseau.....	58
Figure III. 22: La quantité des gaz émis par le système .....	58

# Liste des tableaux

## Liste des tableaux

Tableau I. 1: Famille d'application des groupes électrogènes [12] .....	13
Tableau I. 2 Classification des SH par gamme de puissance .....	24
Tableau II. 1: Evaluation de la consommation .....	29
Tableau II. 2 : Tension du champ en fonction de sa puissance crête.....	35

# Liste des abréviations

## Liste des abréviations

**PV:** Photovoltaïque.

**GPV:** Générateur photovoltaïque.

**GD:** Générateur diesel.

**GE :** Groupe électrogène.

**I-V :** Courant-Tension.

**AC:** courant alternatif.

**CC:** courant continue.

**DC:** Courant continue.

**SEH:** système d'énergie hybride.

**WC:** watt crête.

**DG:** distributed generation.

**NREL:** National Renewable Energy Laboratory

**GHI :** d'irradiance globale horizontale.

**DHI :** D'irradiance horizontale diffuse.

**HOMER:** Hybrid Optimization Model for Electric Renewables.

# *Introduction générale*

# Introduction générale

## Introduction générale

L'énergie électrique joue un rôle essentiel dans notre société moderne, alimentant nos foyers, nos industries et nos infrastructures. Cependant, la production et la consommation d'énergie électrique ont un impact significatif sur l'environnement, contribuant au changement climatique, à la pollution de l'air et à l'épuisement des ressources naturelles. Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre, lors de l'exploitation de ces ressources, des ressources énergétiques alternatives ont été développées et doivent continuer à l'être [1].

Les énergies renouvelables se sont imposées comme des alternatives prometteuses pour répondre à ces enjeux. Ces sources d'énergie, telles que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique et géothermique, sont abondantes et inépuisables à l'échelle humaine, tout en émettant très peu de gaz à effet de serre lors de leur production. L'utilisation accrue des énergies renouvelables contribue à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et à la transition vers une économie plus verte et durable.

Parmi les solutions énergétiques renouvelables, les systèmes hybrides ont gagné en popularité. Les systèmes hybrides combinent deux ou plusieurs sources d'énergie pour fournir une alimentation électrique fiable et efficace. Un exemple courant est le système hybride photovoltaïque/groupe électrogène, qui intègre l'énergie solaire photovoltaïque avec un générateur électrique de secours, permettant de bénéficier des avantages des deux technologies. Ce système hybride offre une production d'électricité propre grâce à l'énergie solaire et assure une alimentation continue grâce à la disponibilité du groupe électrogène en cas de besoin.

Ce travail de recherche se compose de trois chapitres :

- ✓ Le premier chapitre présente en détail le système hybride PV-diesel, couvrant les composants tels que le générateur photovoltaïque, le générateur diesel, le système de stockage, le système de conversion et régulation, le système de supervision, ainsi que la charge. Différentes configurations du système hybride sont également mentionnées.
- ✓ Le deuxième chapitre se concentre sur le site du port de SIDI Ouchaa, en examinant la localisation géographique, le profil de consommation électrique spécifique au port et les données météorologiques pertinentes. Par la suite, le dimensionnement du système hybride électrique (SEH) est effectué.

## Introduction générale

- ✓ Le dernier chapitre consiste en la simulation détaillée d'un système hybride pour l'électrification du port de SIDI Ouchaa en utilisant le logiciel Homer.

# *Chapitre I*

## **Généralité sur le système d'énergie hybride**

# Chapitre I Généralités sur le système d'énergie hybride

## Chapitre I : Généralité sur le système d'énergie hybride

La conception de systèmes énergétiques hybrides intégrant plusieurs sources d'énergie renouvelable est devenue un domaine d'intérêt majeur pour la communauté scientifique, en raison de l'épuisement des ressources traditionnelles et de l'augmentation des coûts d'installation et de maîtrise des sources d'énergie renouvelable. Malgré le caractère aléatoire et discontinu des sources d'énergie renouvelable, les systèmes d'énergie hybrides offrent une alternative pratique et économique aux centrales électriques traditionnelles, en combinant plusieurs sources d'énergie. Ce chapitre présente les différents composants et le fonctionnement des systèmes d'énergie hybrides, ainsi que les différentes configurations du système hybride, dans le but d'encourager l'utilisation accrue de sources d'énergie renouvelable dans la production d'électricité.

## I.2 Système d'énergie hybride

### I.2.1 Définition

Le terme « Système d'Energies Hybrides » fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. Ces systèmes intègrent des sources d'énergies renouvelables telles que : les microcentrales hydroélectriques, les générateurs photovoltaïques, les unités d'énergie éolienne, etc., applicables en fonction de leur disponibilité. Vue le caractère aléatoire des ressources renouvelables, généralement au système, une ou plusieurs sources d'énergie conventionnelle (un générateur diesel par exemple) comme système d'appoint, et des appareils de conditionnement d'énergie sont associés. L'intérêt d'utiliser des technologies multiples est de réunir les avantages et les meilleures caractéristiques opérationnelles de chaque système [1].

### I.2.2 But d'un système hybride PV/GE

Il est possible d'associer des systèmes photovoltaïques (PV) avec d'autres sources d'énergie, telles que des groupes électrogènes, qui sont généralement contrôlables, ou des sources d'énergie aléatoires comme l'énergie éolienne. Dans ces configurations où plusieurs sources d'énergie sont combinées, les avantages de chaque source d'énergie s'additionnent. En d'autres termes, les avantages de chaque source d'énergie sont cumulés pour offrir une solution

# Chapitre I Généralités sur le système d'énergie hybride

énergétique plus efficace et fiable. L'association de systèmes photovoltaïques avec des groupes électrogènes diesel présente de nombreux avantages :

- ✓ Le système photovoltaïque permet de réduire la consommation de carburant, le temps de fonctionnement et la fréquence de maintenance du groupe diesel.
- ✓ La présence du générateur diesel réduit la taille du champ photovoltaïque et le nombre totale des batteries, ce qui réduit considérablement le coût du système.
- ✓ La présence de batteries de stockage réduit la puissance nominale nécessaire du groupe diesel, améliorant ainsi l'efficacité du système
- ✓ Augmenter l'efficacité et la durabilité du système énergétique
- ✓ L'optimisation de l'utilisation des ressources énergétiques disponible
- ✓ Répondre aux besoins énergétiques d'une manière plus écologique et économique

## I.3 Conception et fonctionnement des systèmes hybrides PV/GE /batteries

### I.3.1 Les principaux organes du système hybride

Les systèmes hybrides photovoltaïques/diesel sont typiquement composés de sources d'énergie renouvelable, telles que les panneaux solaires photovoltaïques, de un ou plusieurs groupes électrogènes, ainsi que de systèmes de stockage d'énergie. En outre, ces systèmes intègrent des convertisseurs statiques et dynamiques, des systèmes de surveillance, ainsi que des charges électriques.

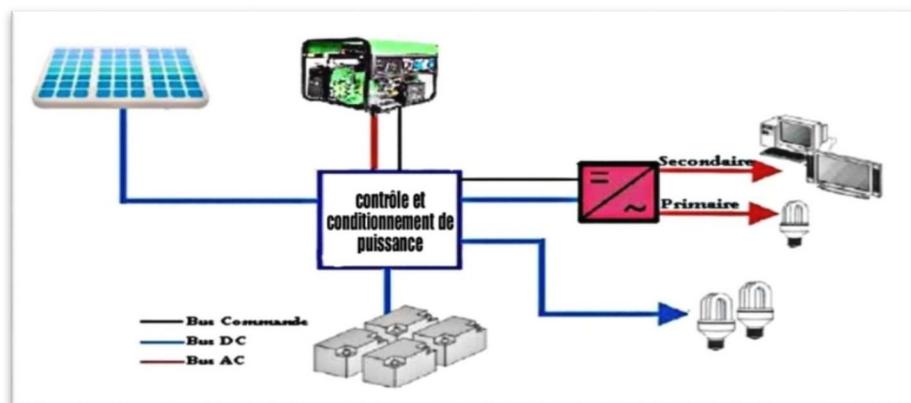


Figure I. 1 : Système hybride PV-diesel.

# Chapitre I Généralités sur le système d'énergie hybride

## **I.3.1.1 Générateur photovoltaïque**

Un générateur photovoltaïque a pour but de convertir l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique. Les panneaux solaires photovoltaïques sont composés de cellules solaires qui contiennent des matériaux semi-conducteurs, tels que le silicium, qui ont la propriété de produire un courant électrique lorsqu'ils sont exposés à la lumière du soleil.

### **I.3.1.1.1 Les cellules photovoltaïques**

Une cellule élémentaire composée de matériaux semi-conducteurs est capable de convertir l'énergie de photons reçus à sa surface en une différence de potentiel, créée par une délocalisation d'électrons dans le matériau. La circulation des électrons dans le circuit extérieur permet à la cellule PV de fonctionner comme un générateur. Les cellules PV sont combinées ensemble pour former un module PV qui peut produire une certaine quantité d'énergie sous des conditions d'éclairement et de température variables. Par la suite les modules PV peuvent être regroupés à leur tour afin de former un générateur PV. Il est dimensionné selon la puissance nécessaire pour une installation donnée [2].

La plupart des cellules PV mesurent autour de 100 cm<sup>2</sup> et ne produisent qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt [3], [4] et [5].

### **I.3.1.1.2 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque**

#### **I.3.1.1.1.1 Caractéristique courant-tension**

Le courant et la tension sont deux des caractéristiques les plus importantes d'une cellule photovoltaïque (PV). Ils déterminent la puissance électrique que la cellule peut fournir à une charge.

Cette caractéristique courant-tension est une relation entre la tension et le courant délivrés par la cellule photovoltaïque [6]. La relation entre le courant et la tension de sortie d'une cellule photovoltaïque est appelée la courbe courant-tension. Cette courbe est essentielle pour comprendre le comportement électrique d'une cellule PV et est utilisée pour déterminer les performances de la cellule dans différentes conditions d'éclairement solaire et de température. La courbe courant-tension d'une cellule PV peut être représentée graphiquement comme suit :

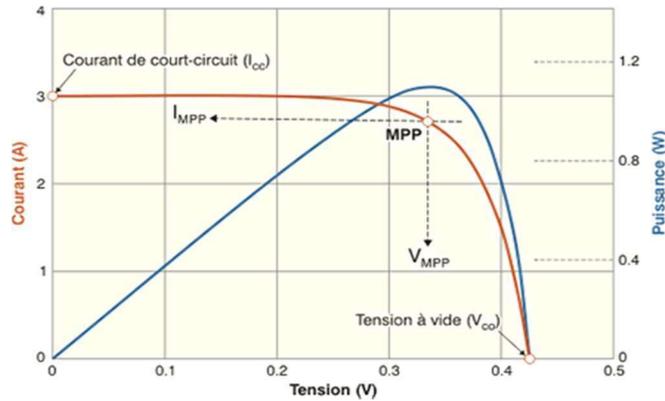


Figure I. 2 : La courbe courant-tension d'une cellule PV.

Les principales caractéristiques de cette courbe sont les suivantes :

❖ **Courant de court circuit ( $I_{cc}$ )**

Le courant de court-circuit est le courant maximal que la cellule peut produire lorsqu'elle est court-circuitée (c'est-à-dire, lorsqu'une charge n'est pas connectée).

❖ **Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ )**

La tension de circuit ouvert est la tension maximale que la cellule peut fournir lorsque le courant de sortie est nul. Il s'agit de la valeur de la tension lorsque la cellule est en circuit ouvert.

❖ **Puissance maximale (MPP)**

La puissance de crête est la puissance maximale que la cellule peut produire lorsqu'elle est exposée à la lumière solaire la plus intense possible. Elle est égale au produit de la tension de circuit ouvert et du courant de court-circuit.

❖ **Tension maximale de puissance ( $V_{mpp}$ )**

La tension de sortie à laquelle la cellule fournit la puissance maximale.

❖ **Courant maximal de puissance ( $I_{mpp}$ )**

Le courant de sortie correspondant à la tension maximale de puissance.

### I.3.1.1.2 Efficacité

L'efficacité d'une cellule photovoltaïque est la mesure de sa capacité à convertir la lumière solaire en électricité. Les cellules photovoltaïques modernes ont une efficacité d'environ 15% à 20%, bien que certaines cellules de pointe atteignent des niveaux d'efficacité supérieurs à 25%.

# Chapitre I Généralités sur le système d'énergie hybride

## I.3.1.1.3 Température de fonctionnement

La performance d'une cellule photovoltaïque peut être affectée par la température ambiante. Les cellules photovoltaïques ont une plage de température de fonctionnement optimale, qui dépend du matériau utilisé dans la cellule.

## I.3.1.1.3 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque repose sur l'effet photoélectrique, qui est le phénomène par lequel les matériaux semi-conducteurs absorbent la lumière et produisent des électrons.

Une cellule solaire est une jonction PN éclairée [7]. Une cellule photovoltaïque est composée de deux couches de matériaux semi-conducteurs, appelées la couche P (pour positive) et la couche N (pour négative). Ces deux couches sont séparées par une zone de jonction, appelée la jonction PN. Lorsque la lumière du soleil frappe la cellule photovoltaïque, elle est absorbée par la couche N, ce qui provoque l'émission d'électrons. Ces électrons sont alors attirés par la couche P, qui est chargée positivement, et ils se déplacent le long d'un circuit électrique connecté aux bornes de la cellule. Ce mouvement des électrons crée un courant électrique qui peut être utilisé pour alimenter des appareils électriques.

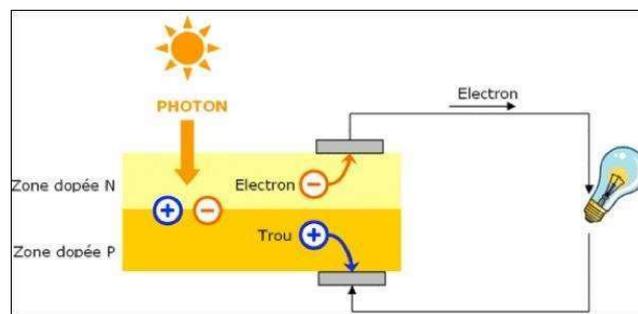


Figure I. 3 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV.

## I.3.1.1.4 Les technologies des cellules photovoltaïques

Le silicium est l'un des matériaux les plus répandus sur notre planète, étant notamment présent dans le sable. Toutefois, pour la production de cellules photovoltaïques, il est essentiel de disposer d'un matériau d'une pureté élevée, ce qui nécessite un processus de fabrication coûteux. Le coût de ce processus varie en fonction de la technologie utilisée pour la fabrication des cellules photovoltaïques, on trouve :

# Chapitre I Généralités sur le système d'énergie hybride

## I.3.1.1.4.1 Silicium monocristallin

La technologie la plus coûteuse pour la production de cellules photovoltaïques utilise des barres de silicium pur, qui sont également utilisées dans la fabrication de puces électroniques. Cette technologie est basée sur l'utilisation de silicium monocristallin, qui est une matière première de très haute pureté. Les cellules photovoltaïques fabriquées à partir de ce matériau peuvent atteindre un rendement de 12 à 16%.

## I.3.1.1.4.2 Silicium polycristallin

La fabrication de silicium polycristallin implique la fonte des chutes de silicium monocristallin, et cette technologie est mieux maîtrisée sur le plan industriel, ce qui en fait une option de coût de production moyen. Les cellules photovoltaïques fabriquées à partir de ce matériau ont un rendement compris entre 11 et 14%.

## I.3.1.1.4.3 Silicium amorphe

La technologie à base de silicium amorphe présente l'avantage d'avoir des coûts de production peu élevés, mais malheureusement, son rendement est très faible, atteignant seulement 8 à 10%. Les cellules photovoltaïques fabriquées à partir de ce matériau ont une couleur gris foncé. Cette technologie permet l'utilisation de couches de silicium très minces, ou l'application de couches de silicium amorphe très minces sur des supports tels que le verre, les plastiques souples ou les métaux. Le silicium amorphe est le matériau le plus couramment utilisé dans les petits produits de consommation tels que les calculatrices et les montres, mais récemment, il est également utilisé sur de grandes surfaces de toiture.



Figure I. 4: Les technologies des cellules photovoltaïques

## I.3.1.1.5 Module photovoltaïque

Le module PV est donc composé de plusieurs cellules associées en série et/ou parallèle, disposées en rangées. Cet assemblage de cellules se fait de manière différente suivant les

## Chapitre I Généralités sur le système d'énergie hybride

technologies et peut entraîner des pertes supplémentaires à celles déjà évoquées précédemment au sein de la cellule (pertes optiques et électriques [8]).

### I.3.1.1.6 Caractéristiques d'un module

#### ➤ La caractéristique $I(V)$ d'un panneau solaire photovoltaïque

Est directement liée à celle de la cellule solaire de base, puisqu'un panneau solaire est une association de plusieurs cellules solaires, il est caractérisé par la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  et le courant de court-circuit  $I_{cc}$ .

#### ➤ Tension de circuit- ouvert ( $V_{co}$ )

Elle représente la tension maximale que peut produire le panneau solaire lorsque celui-ci n'est pas connecté à une charge. Cette tension est obtenue lorsque le courant électrique est nul et que le panneau solaire fonctionne en circuit ouvert.

#### ➤ Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )

Il représente le courant électrique maximal que peut fournir le panneau solaire lorsqu'il est court-circuité, c'est-à-dire lorsqu'il est connecté à une charge de résistance nulle.

#### ➤ Puissance maximale ( $P_{max}$ )

La puissance électrique produite par un module photovoltaïque sous l'effet de la lumière solaire dépend de la résistance de charge externe à ses bornes. La puissance électrique fournie par le module est maximale pour un point de fonctionnement spécifique, noté  $P_{max}$  ( $I_{opt}$ ,  $V_{opt}$ ), qui se situe sur la courbe Courant-Tension ( $IV$ ) du module.

#### ➤ Facteur de forme ( $FF$ )

Il est défini comme le rapport entre la puissance électrique maximale théorique ( $P_{max}$ ) du module et la puissance électrique réelle que le module est capable de produire (c'est à dire la puissance maximale d'un module idéal). Il est généralement compris entre 0,6 et 0,8.

#### ➤ Coefficient de température

C'est la variation des paramètres électriques en fonction de la température ambiante. Ce coefficient est souvent utilisé pour ajuster les performances attendues du module en fonction des conditions environnementales. Valeur typique,  $-0,45\% / ^\circ C / cellule$ .

# Chapitre I Généralités sur le système d'énergie hybride

## ➤ Rendement

Le rendement d'un module photovoltaïque est la mesure de sa capacité à convertir l'énergie solaire en énergie électrique utilisable. Le rendement est défini comme le rapport entre la puissance électrique produite par le module et l'énergie solaire incidente sur le module.

## ➤ Durée de vie

La durée de vie d'un module photovoltaïque est une mesure de sa capacité à produire de l'énergie électrique de manière fiable et efficace pendant une période prolongée. En général, les fabricants de modules photovoltaïques présentent une durée de vie minimale de 25 ans.

### I.3.1.2 Générateur diesel

Dans les installations à sources d'énergies renouvelables autonomes, il est impératif de disposer d'un mécanisme de stockage d'énergie et/ou d'intégrer un ou plusieurs groupes électrogènes pour garantir la continuité dans la fourniture d'énergie électrique. Les générateurs diesel sont largement utilisés dans les systèmes hybrides en raison de leur rôle essentiel. Leur intégration offre une source d'énergie rapide et fiable, qui permet de réduire considérablement la taille de l'installation solaire.

#### Définition

Un générateur diesel, également connu sous le nom de groupe électrogène diesel, est un dispositif électromécanique qui convertit l'énergie chimique stockée dans le carburant diesel en énergie électrique. Il est constitué d'un moteur diesel qui fait tourner un alternateur pour produire de l'électricité. Les générateurs diesel sont couramment utilisés pour produire de l'électricité dans les zones où le réseau électrique n'est pas disponible ou dans les cas d'urgence où l'alimentation électrique est interrompue. Ils sont également utilisés comme source d'énergie de secours pour les installations à sources d'énergie renouvelable ou pour fournir de l'électricité à des sites isolés tels que les chantiers de construction ou les événements en plein air.

Un groupe électrogène est une machine constituée de deux grandes parties [9] :

- Une partie motrice qui fournit l'énergie mécanique sous forme de rotation de l'arbre à partir de la transformation de l'énergie chimique d'un carburant, tels que les moteurs thermiques, les groupes Diesel ou à essence.

## Chapitre I Généralités sur le système d'énergie hybride

- Et une deuxième partie génératrice qui convertit l'énergie mécanique rotative récupérée sur l'arbre de la partie motrice en énergie électrique. conversion d'énergie.

### I.3.1.2.1 Les composantes d'un générateur diesel

Un groupe électrogène est un système autonome de production d'électricité qui utilise un moteur à combustion interne pour faire tourner un alternateur et produire de l'électricité. Les composantes de base d'un groupe électrogène comprennent :

#### I.3.1.2.1.1 Moteur diesel

Le moteur diesel d'un groupe électrogène fonctionne selon le principe de la combustion interne, comme tout autre moteur diesel. Lorsque le groupe électrogène est démarré, le moteur diesel commence à tourner, entraînant l'alternateur pour produire de l'électricité. Le moteur est généralement alimenté par un réservoir de carburant qui fournit le carburant nécessaire pour faire fonctionner le moteur. Le carburant diesel est injecté dans la chambre de combustion à haute pression, où il s'enflamme spontanément sous l'effet de la chaleur et de la pression élevée de l'air comprimé.

#### I.3.1.2.1.2 Alternateur

L'alternateur est composé d'un rotor qui entre en mouvement grâce au moteur. Il tourne autour d'un stator, qui contient un circuit magnétique. Ce mouvement crée un champ magnétique. Le stator transforme le flux magnétique en énergie électrique [10].

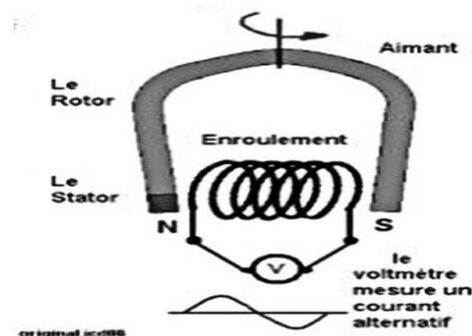


Figure I. 5: Schématique d'un alternateur

## Chapitre I Généralités sur le système d'énergie hybride

**Rotor :** C'est la partie centrale de l'alternateur qui tourne à l'intérieur d'une bobine fixe. Il est généralement constitué d'un arbre en acier et d'un ensemble d'aimants permanents ou d'électroaimants qui produisent un champ magnétique rotatif.

**Stator :** C'est la bobine fixe qui entoure le rotor. Il est composé d'un ensemble de bobines de cuivre disposées en forme de cercle autour du rotor. Lorsque le rotor tourne, il crée un champ magnétique qui traverse les bobines du stator, induisant une tension électrique dans les bobines.

### I.3.1.2.1.3 L'armoire de contrôle

Contient les commandes de démarrage et d'arrêt du groupe électrogène. La puissance d'un groupe électrogène se mesure en watts. Plus un groupe électrogène est puissant, plus son rendement sera élevé. Les appareils les plus modernes permettent d'adapter leur puissance selon la consommation réelle [11].

### I.3.1.2.2 Les classes de puissance

La puissance d'un groupe électrogène est définie comme la puissance disponible aux bornes de l'alternateur, déduction faite de la puissance électrique absorbée par les auxiliaires essentiels [12].

Trois types de puissances sont définis pour les groupes électrogènes [12]:

- ✓ La puissance continue correspond à la puissance que le groupe est capable de fournir en service continu, pendant un nombre illimité d'heures par an, tout en respectant les arrêts normaux de maintenance et dans les conditions ambiantes définies.
- ✓ La puissance principale correspond à la puissance maximale que peut fournir le groupe sous une charge variable pendant un nombre illimité d'heures par an et dans les conditions ambiantes définies. La puissance moyenne admissible sur une période de 24 heures, ne doit pas être supérieure à une fraction de la puissance principale.
- ✓ La puissance pour utilisation limitée correspond à la puissance maximale que peut fournir le groupe avec une durée annuelle limitée à 500 heures et une marche continue maximale de 300 heures, en respectant les arrêts pour maintenances. Toutefois, le fonctionnement dans ces conditions peut affecter la durée de vie du groupe.

# Chapitre I Généralités sur le système d'énergie hybride

## I.3.1.2.3 Classes d'application

Un groupe électrogène est défini en fonction des exigences de son utilisation. Il existe quatre classes d'utilisation des groupes électrogènes [12] :

- **La classe G1** : définie pour l'alimentation des charges ne nécessitant que des contraintes mineures en tension et en fréquence. Exemple : éclairage et charges électriques.
- **La classe G2** : définie pour l'alimentation de charges nécessitant des caractéristiques proches de celle du réseau public ; sur application brutale de la charge, des fluctuations temporaires en tension et fréquence sont admises. Exemples : éclairages, pompes, ventilateurs, ...
- **La classe G3** : définie pour des exigences sévères en tension, en fréquence et en Forme d'onde. Exemple : charges régulées par thyristors, télécommunication.
- **La classe G4** : définie pour des exigences en tension, en fréquence et en forme d'onde exceptionnellement sévères. Exemple : systèmes informatiques.

**Tableau I. 1: Famille d'application des groupes électrogènes [12]**

Vitesse de rotation	Type	Puissances	Applications
3000 tr/min	Rapide	Faible	Domestiques secours
$900 < N < 1800$ tr/min	Rapide	Moyenne $< 5000$ KVA	Production-secours
$350 < 900$ tr/min	Semi rapide	Forte, $4 < P < 20$ MVA	Production-secours
$N < 350$ tr/min	Lent	Forte	Production

## I.3.1.3 Systèmes de stockage

L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable très prometteuse pour répondre aux besoins croissants en électricité. Cependant, son utilisation efficace nécessite un système de stockage d'énergie solaire fiable et efficace pour répondre à la demande en électricité pendant les périodes où la production d'électricité solaire est insuffisante, comme pendant la nuit ou les périodes de faible ensoleillement. Les batteries solaires sont donc devenues une solution de stockage d'énergie solaire populaire et pratique. Cette technologie permet de stocker l'énergie produite par les panneaux solaires pendant les heures de production et de la restituer lorsqu'elle

# Chapitre I Généralités sur le système d'énergie hybride

est nécessaire, en fournissant une source d'énergie constante et fiable pour les systèmes électriques autonomes ou connectés au réseau.

## I.3.1.3.1 Définition d'une batterie

Une batterie solaire est un dispositif de stockage d'énergie électrique qui permet de stocker l'énergie produite par des panneaux solaires sous forme chimique pour une utilisation ultérieure, en utilisant des accumulateurs électriques reliés entre eux pour créer un générateur électrique de la tension et de la capacité souhaitées. Ces accumulateurs sont également appelés éléments de la batterie ou cellules.

La batterie est une unité de stockage d'énergie électrique qui fournit un courant continu sous tension électrique continu (DC) [13].

## I.3.1.3.2 Rôle d'une batterie

Le stockage de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques est réalisé exclusivement au moyen de batteries d'accumulateurs. Dans un système photovoltaïque, les batteries remplissent trois fonctions fondamentales qui contribuent à garantir le bon fonctionnement du système dans son ensemble :

- ❖ **Autonomie** : Une batterie assure l'alimentation électrique de la charge en tout temps, indépendamment des conditions météorologiques ou de l'heure de la journée. Cela rend la source d'énergie fiable et continue.
- ❖ **Courant de surcharge**: Dans le cadre d'un système d'énergie solaire photovoltaïque, il est courant d'utiliser une batterie pour stocker l'énergie électrique produite par les panneaux solaires. En plus de cette fonction de stockage, la batterie peut également fournir un courant de surcharge pendant une brève période. Ce courant de surcharge est supérieur à celui que le champ photovoltaïque peut fournir. Cette fonctionnalité est essentielle pour permettre le démarrage des moteurs et autres appareils qui donnent un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.
- ❖ **Stabilisation de la tension** : Les batteries jouent un rôle crucial dans la production d'énergie solaire en éliminant les fluctuations de tension du champ photovoltaïque. Elles permettent également aux appareils de fonctionner à une tension optimale, ce qui maximise leur efficacité et prolonge leur durée de vie. En effet, en fournissant une tension constante, les batteries permettent aux équipements de fonctionner de manière stable et fiable, ainsi les dommages subis par les fluctuations de tension.

# Chapitre I Généralités sur le système d'énergie hybride

## I.3.1.3.3 Caractéristiques d'une batterie

Les caractéristiques d'une batterie solaire sont essentielles pour assurer son bon fonctionnement en tant que système de stockage d'énergie solaire. Les principales caractéristiques d'une batterie solaire comprennent :

### ➤ Capacité de stockage

La capacité de stockage d'une batterie solaire représente la quantité d'énergie qu'elle peut stocker. Elle est mesurée en ampères-heures (Ah) et détermine la quantité d'énergie que la batterie peut fournir avant de devoir être rechargée.

### ➤ Tension nominale

La tension nominale d'une batterie solaire est la tension maximale de sortie lorsque la batterie est complètement chargée.

### ➤ État de charge et profondeur de décharge

Le niveau de charge d'une batterie, exprimé en pourcentage, correspond au rapport entre la capacité résiduelle de la batterie et sa capacité nominale. Ce paramètre est appelé état de charge (SOC) et représente l'énergie électrique restante dans la batterie. En outre, la profondeur de décharge (DOD), également exprimée en pourcentage, correspond à la quantité d'énergie électrique qui a déjà été consommée de la capacité nominale de la batterie. La somme des valeurs de SOC et DOD est toujours égale à 100. Les batteries solaires ont généralement une profondeur de décharge maximale de 50 % à 80 % pour prolonger leur durée de vie.

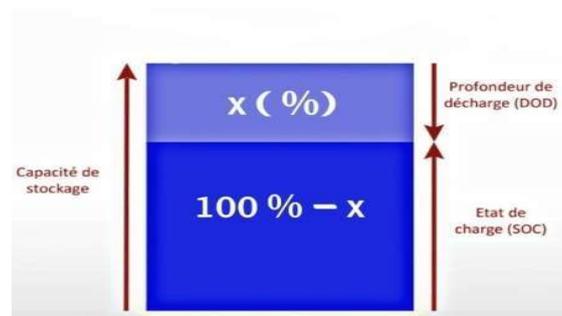


Figure I. 6: État de charge et profondeur de décharge d'une batterie

# Chapitre I Généralités sur le système d'énergie hybride

## **Nombre de cycles**

Un cycle correspond à une charge complète et une décharge complète de la batterie. Le nombre de cycles indique le nombre de fois que la batterie peut être chargée et déchargée avant que sa capacité ne diminue considérablement.

### ➤ **Taux de décharge**

Le taux de décharge d'une batterie solaire représente la quantité d'énergie que l'on peut extraire de la batterie en une heure. Il est mesuré en ampères (A) et dépend de la capacité de stockage de la batterie. Les batteries solaires ont un taux de décharge maximal de 1C, ce qui signifie qu'une batterie de 100 Ah peut fournir un courant maximal de 100 A.

### ➤ **Rendement**

Le rendement d'une batterie solaire est le rapport entre l'énergie restituée lors de la décharge et l'énergie stockée lors de la charge. Il est exprimé en pourcentage (%). En d'autres termes, c'est la quantité d'énergie qui peut être extraite de la batterie par rapport à la quantité d'énergie qui a été stockée.

### ➤ **Durée de vie**

La durée de vie d'une batterie solaire dépend de nombreux facteurs tels que la qualité de fabrication, les conditions d'utilisation et la maintenance. Les batteries solaires ont généralement une durée de vie de 3 à 10 ans, en fonction de leur type et de leurs utilisations.

## **I.3.1.3.4 Les types de batterie solaire**

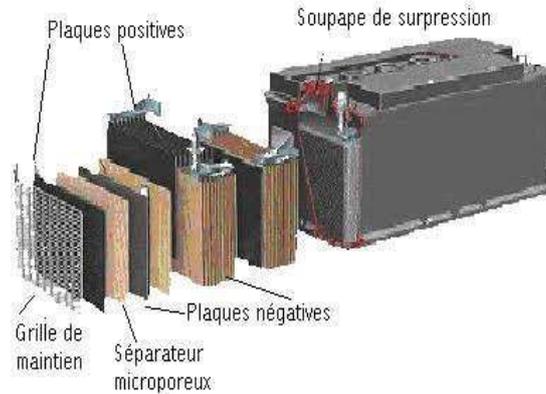
Il existe différents types de batteries solaires disponibles sur le marché, chacun ayant des caractéristiques et des avantages spécifiques pour les applications solaires. Les types de batteries solaires couramment utilisés sont les suivants :

### **I.3.1.3.4.1 Batteries au plomb-acide**

Les accumulateurs au plomb (Pb) sont des batteries à électrolyte liquide composées de deux électrodes, l'une positive et l'autre négative, immergées dans l'acide sulfurique réduit. Conçues pour délivrer une puissance instantanée. Les batteries au plomb-acide sont les plus couramment utilisées dans les applications solaires en raison de leur faible coût et de leur fiabilité. Elles sont

## Chapitre I Généralités sur le système d'énergie hybride

souvent utilisées dans les systèmes d'énergie solaire domestiques et sont disponibles dans des tailles allant de quelques Ah à plusieurs centaines d'Ah.0



**Figure I. 7: batterie solaire au plomb-acide**

### **I.3.1.3.4.2 Batteries AGM**

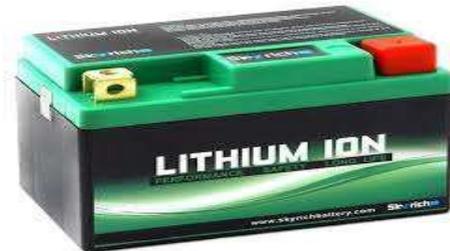
Les batteries AGM, connues sous le nom de batteries à électrolyte pauvre, sont dotées d'un maillage très fin en fibre de verre entre les plaques de la batterie. Ce maillage joue un rôle essentiel en retenant et immobilisant l'électrolyte. Contrairement aux autres batteries, l'électrolyte est maintenu dans les mats de verre plutôt que de se répandre librement sur les plaques. Ces fibres de verre sont soigneusement tissées pour augmenter la surface de contact, permettant ainsi de retenir une quantité adéquate d'électrolyte (jusqu'à 95%) sur les cellules tout au long de la durée de vie de la batterie. Grâce à cette configuration avec la matelas de verre et les électrodes de plomb, les plaques restent immobiles même en cas de vibrations, ce qui les rend résistantes aux perturbations mécaniques. De plus, elles présentent une bonne performance même à des températures de congélation. Cependant, il convient de noter que les batteries AGM sont généralement plus coûteuses que les batteries en gel ou SLA.

### **I.3.1.3.4.3 Batteries au lithium-ion**

La technologie de la batterie au lithium-ion repose sur l'échange réversible de l'ion lithium entre une électrode positive généralement constituée d'un oxyde de métal de transition au lithium et d'une électrode négative en graphite. Cette réaction permet de stocker l'énergie électrique dans la batterie. Il est à noter que la tension électrique d'un élément lithium-ion est d'environ 3.6V. Des accumulateurs industriels de grande puissance ont également été développés à base de cette technologie, offrant une durée de vie allant jusqu'à 15 ans. Cependant, l'utilisation de la technologie lithium-ion à de telles échelles de puissance est encore en phase d'expérimentation et de développement.

## Chapitre I Généralités sur le système d'énergie hybride

Le cycle de vie des batteries au lithium-ion varie également selon le fabricant et la technologie. La plupart sont évaluées à 500-1000 cycles, les plus élevées pouvant atteindre 10 000 cycles si la cellule est basée sur des anodes en carbone. La dégradation dépend principalement de la température, à l'exception de la profondeur de décharge [14].



**Figure I. 8: batterie solaire lithium-ion**

### I.3.1.3.4 Batteries au Nickel Cadmium

L'accumulateur Nickel-Cadmium, également connu sous le nom de batterie NiCd, est une batterie rechargeable qui utilise un électrolyte alcalin et une réaction électrochimique entre l'hydroxyde de nickel et le cadmium pour stocker l'énergie électrique. La batterie est composée d'un boîtier en acier ou en plastique qui contient plusieurs cellules électrochimiques. Chaque cellule contient une anode en cadmium, une cathode en hydroxyde de nickel, un séparateur poreux et une solution d'électrolyte alcalin.

De nos jours, les batteries NiCd sont progressivement remplacées par des batteries lithium-ion dans les applications solaires en raison de leur densité d'énergie plus élevée et de leur efficacité supérieure. Cependant, les batteries NiCd restent une option viable pour les applications solaires à faible coût et à faible intensité de décharge extérieure, telles que l'éclairage solaire.



**Figure I. 9 :batterie solaire au NiCd**

### **I.3.1.4 Système de régulation**

Le régulateur de charge constitue un dispositif crucial dans les systèmes photovoltaïques pour contrôler la charge des batteries. Il remplit plusieurs fonctions importantes pour garantir un fonctionnement optimal et une longévité accrue des batteries, notamment :

- Surveiller la tension et le courant produits par les panneaux solaires pour ajuster le taux de charge de la batterie en conséquence
- Prévenir les surcharges et les décharges excessives de la batterie, qui peuvent endommager celle-ci et réduire sa durée de vie
- Optimiser la charge de la batterie en veillant à ce qu'elle soit correctement remplie et en empêchant les décharges excessives
- Protéger le système contre les surintensités et les surtensions qui peuvent endommager les composants du système.

L'importance du régulateur de charge pour les systèmes photovoltaïques est donc incontestable, car il permet d'assurer une charge appropriée de la batterie, garantissant ainsi la performance et la longévité du système dans son ensemble.

### **I.3.1.5. Les convertisseurs**

Les convertisseurs sont des composants essentiels dans un système hybride PV/GE, car ils permettent de convertir l'énergie électrique produite par les panneaux solaires en une forme d'énergie utilisable par les équipements électriques et les batteries. Ils sont essentiels pour garantir une performance optimale et une durée de vie prolongée du système. Il existe deux types de convertisseurs couramment utilisés dans les systèmes hybrides photovoltaïques :

## Chapitre I Généralités sur le système d'énergie hybride

- **convertisseurs de tension CC/CC** : Ils sont utilisés pour convertir la tension continue produite par les panneaux solaires en une tension continue appropriée pour les batteries de stockage d'énergie. Ces convertisseurs sont souvent utilisés dans les systèmes de stockage d'énergie à faible tension.
- **Les convertisseurs de tension CC/CA** : Ils sont utilisés pour convertir la tension continue produite par les panneaux solaires en une tension alternative appropriée pour les équipements électriques. Ces convertisseurs sont souvent utilisés dans les systèmes de stockage d'énergie à haute tension, comme les systèmes d'alimentation électrique des bâtiments.

### I.3.1.6 Système de supervision

Le système de supervision dans un système hybride photovoltaïque/groupe électrogène est un ensemble de dispositifs, logiciels et procédures qui permettent de surveiller et de contrôler les différents éléments du système hybride en temps réel. Il est conçu pour garantir un fonctionnement optimal et fiable du système en optimisant l'utilisation des ressources disponibles, en diagnostiquant les pannes et en fournissant des recommandations pour les réparations et les améliorations.

### I.3.1.7 Les charge

Les charges électriques comprennent l'ensemble des récepteurs qui doivent être alimentés par l'énergie produite par la centrale électrique. Ces charges peuvent être de type continu, telles que les équipements de télécommunications ou les pompes à eau, ou de type alternatif, comme c'est le cas pour les utilisations domestiques, qui nécessitent un onduleur pour la conversion de l'énergie. Les caractéristiques d'un récepteur électrique sont généralement indiquées sur sa plaque signalétique, et incluent des informations telles que le facteur de puissance, la tension d'utilisation, la fréquence du courant d'alimentation, la puissance et le rendement.

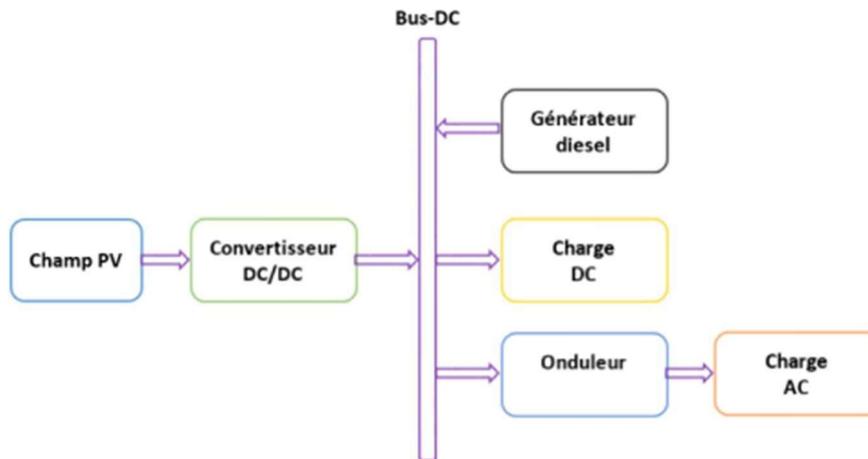
## I.4 Différentes configurations du système hybride

### I.4.1 Configuration PV/Diesel série

Dans cette configuration, l'énergie produite par le générateur diesel est d'abord redressée puis convertie en courant alternatif pour alimenter la charge, ce qui entraîne des pertes de conversion importantes. Lorsque l'énergie générée et stockée par le champ photovoltaïque est suffisante

## Chapitre I Généralités sur le système d'énergie hybride

pour répondre aux exigences de la charge, le moteur diesel est déconnecté. Le courant continu fourni par le champ magnétique et la batterie est converti en courant alternatif par un onduleur. Aussi, il est important de noter que dans la plupart de ces systèmes, puisque la majeure partie de l'énergie est transférée par la batterie, l'efficacité du système est réduite, augmentant ainsi le nombre de cycles de charge-décharge [15].



**Figure I. 10: Configuration PV/Diesel série**

### Avantage [16] :

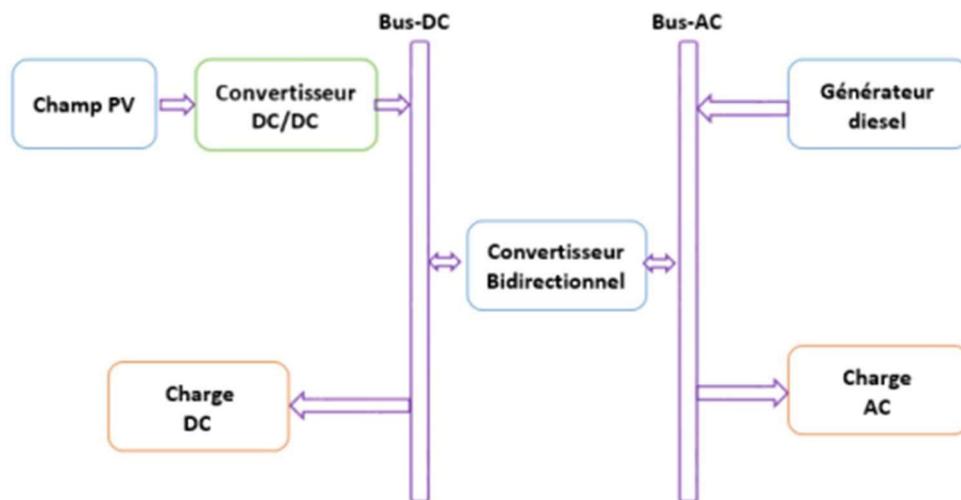
- Un simple dimensionnement du générateur.
- Une alimentation convenable de la charge par l'onduleur.
- Simplicité de la commande.

### Inconvénients [16] :

- Un rendement relativement faible dans le cas d'un générateur diesel à courant alternatif.
- La détérioration de l'onduleur provoque l'arrêt complet de l'alimentation.

### I.4.2 Configuration PV/Diesel parallèle

Ici toutes les sources peuvent alimenter la charge séparément à faible et moyenne demande car les deux sources d'énergie sont dimensionnées pour des pourcentages bien définis de la charge. Mais également en combinant les sources, elles peuvent faire face à la puissance maximale de la charge. C'est à dire coupler les différentes sources d'énergies et ainsi diminuer leur puissance respective. Dans cette architecture, le champ photovoltaïque produit tant qu'il y a de l'ensoleillement, contrairement au générateur diesel qui fonctionne en permanence car il constitue le réseau pour les onduleurs [17,18].



**Figure I. 11: Configuration PV/Diesel parallèle**

### Avantages [16] :

- Le fonctionnement en parallèle diminue la possibilité de coupure de l'alimentation de la charge.
  - Le générateur diesel est directement lié à la charge ce qui augmente le rendement.
  - Dimensionnement des composants minimale.

### Inconvénient [16] :

- Une commande complexe, difficulté de contrôle du bus continu.
- L'onduleur doit fournir une tension sinusoïdale, pour que la synchronisation avec le générateur diesel soit possible.
- Nécessité des personnes qualifiées.

### I.4.3 Configuration PV/Diesel commutée

Dans cette configuration, le champ PV et le groupe électrogène ne peuvent pas fonctionner simultanément, ils sont dimensionnés à cet effet pour satisfaire chacun toute la charge. Lorsque le niveau de charge des batteries est tel que la demande ne peut être satisfaite par le champ solaire, ce dernier est déconnecté de l'alimentation des charges et le groupe électrogène est mis en marche pour alimenter directement les charges. En cas de surplus d'énergie, il complète la charge de la batterie. Le groupe électrogène est arrêté lorsque la demande peut être satisfaite par le champ solaire et les batteries. L'inversion de source se fait manuellement. Dans cette

## Chapitre I Généralités sur le système d'énergie hybride

configuration les pertes de conversion sont réduites par rapport à la précédente car le groupe électrogène alimente directement la charge [17–18].

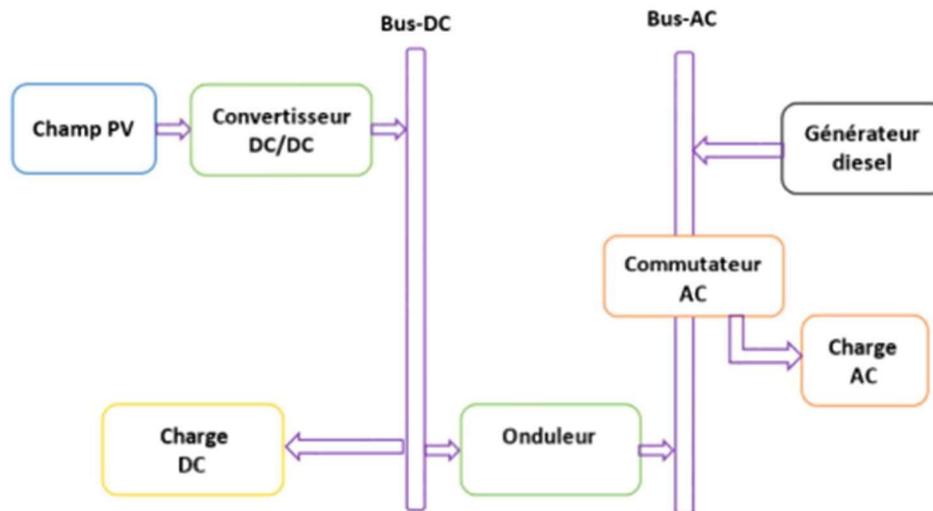


Figure I. 12: Configuration PV/Diesel commuté

### Avantages [16] :

- Rendement élevé du générateur diesel.
- Un problème dans l'onduleur n'engendrera pas l'arrêt complet de l'alimentation électrique car le générateur peut satisfaire la charge.

### Inconvénients [16] :

- Une coupure instantanée lors de la commutation des sources.
- Un dimensionnement plus grand de générateur diesel et de l'onduleur.

## I.5 Classification des systèmes hybrides

Le champ d'application des systèmes hybrides est trop vaste à cause des multiples structures, cette richesse en structure mène la tâche de classification des systèmes un peu compliqué, on peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance selon le tableau suivant [1].

## Chapitre I Généralités sur le système d'énergie hybride

**Tableau I. 2 Classification des SH par gamme de puissance**

Puissance du SH en KW	Application
Faible < 5	Système autonome : station de télécommunication, pompage de l'eau, autres applications isolées.
Moyenne entre 10 et 250	Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, des zones rurales...
Grande > 500	Grand réseaux isolés

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons examiné les concepts généraux des systèmes hybrides, ainsi que leurs différents composants. Nous avons également rappelé les principes fondamentaux de l'énergie solaire et du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium et ces caractéristiques. Nous avons également abordé le générateur diesel, en rappelant son fonctionnement et ses différentes parties. Enfin, nous avons présenté trois configurations courantes des systèmes hybrides associant l'énergie solaire photovoltaïque et le générateur électrique.

# *Chapitre II*

Dimensionnement du système hybride PV/DIESEL

# Chapitre II Dimensionnement du système hybride PV/DIESEL

## Chapitre II: Dimensionnement du système hybride PV/DIESEL

Lors de la mise en place d'un système de production d'énergie dans des régions éloignées ou souffrant de limitations d'accès au réseau électrique, les systèmes hybrides PV/GE offrent une solution efficace et fiable pour répondre aux besoins énergétiques. Ces systèmes combinent l'utilisation de panneaux solaires photovoltaïques, convertissant directement l'énergie solaire en électricité, avec un groupe électrogène alimenté par des combustibles fossiles, tels que le diesel.

Le dimensionnement d'un système hybride PV/GE implique plusieurs étapes essentielles. Tout d'abord, il est crucial de réaliser une analyse approfondie du site pour évaluer les conditions environnementales, notamment l'irradiation solaire disponible et la demande énergétique locale. Cette analyse permet de déterminer les caractéristiques spécifiques du système à mettre en place.

Les composantes principales d'un système hybride comprennent les panneaux solaires photovoltaïques, les batteries de stockage d'énergie, l'onduleur, le groupe électrogène et les dispositifs de contrôle et de gestion de l'énergie. Le dimensionnement de chaque composante repose sur des paramètres tels que la puissance requise, la capacité de stockage, la durée de fonctionnement du groupe électrogène et les cycles de charge et de décharge des batteries.

### II.1 L'objectif général

L'objectif principal est de produire de l'électricité à l'infrastructure porteuse de Sidi-Youchaa en utilisant des systèmes photovoltaïques afin de promouvoir la protection de l'environnement. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de poursuivre plusieurs objectifs spécifiques, notamment :

- ✓ Identifier les charges à alimenter en électricité à partir des systèmes photovoltaïques.
- ✓ Évaluer la faisabilité technique et financière des microcentrales photovoltaïques.
- ✓ Réaliser une étude de faisabilité économique du projet et résumer l'impact environnemental du projet.
- ✓ Analyser la possibilité de généraliser ce projet dans d'autres régions.

### II.2 Dimensionnement technico-économique

Le dimensionnement des systèmes PV est toujours confronté à deux critères essentiels qui sont le gisement solaire et la charge, entre lesquels se trouvent les dispositifs de conversion et de régulation pour gérer l'énergie mise en jeu et le système de stockage pour pallier à la non disponibilité de la source solaire. Le dimensionnement d'une installation photovoltaïque repose sur la détermination du nombre nécessaire de panneaux solaires constituant le champ photovoltaïque suffisant pour couvrir les besoins de la charge ainsi que la capacité de charge de la batterie [19].

#### II.2.1 Présentation du site et caractéristiques de la charge

##### II.2.1.1 L'emplacement du système hybride

Dans le cadre de cette étude, une localisation géographique est considérée : le port de SIDI OUCHAA.

Le port de SIDI OUCHAA est situé dans la ville de SIDI OUCHAA, dans la wilaya de Tlemcen, en Algérie. Actuellement, le port ne dispose d'aucune infrastructure, mais il est en cours de construction. Ce nouveau port représente un projet vital dans le développement économique. Une fois achevé, il deviendra un centre stratégique pour le commerce maritime et le transport de marchandises. On s'attend à ce que ce nouveau port contribue à renforcer l'activité économique locale, à promouvoir les relations commerciales et à créer des opportunités d'emploi dans la région.

##### Coordonnées du site :

- ✓ Wilaya : Tlemcen
- ✓ Site : SIDI OUCHAA
- ✓ Latitude : 35,11643° ou 35° 6' 59" nord
- ✓ Longitude : -1,77892° ou 1° 46' 44" ouest
- ✓ L'altitude : 5 mètres (16 pieds)
- ✓ Temps : GMT + 0:00
- ✓ Température ambiante min : 13.75°C
- ✓ Température ambiante max : 22.03°C

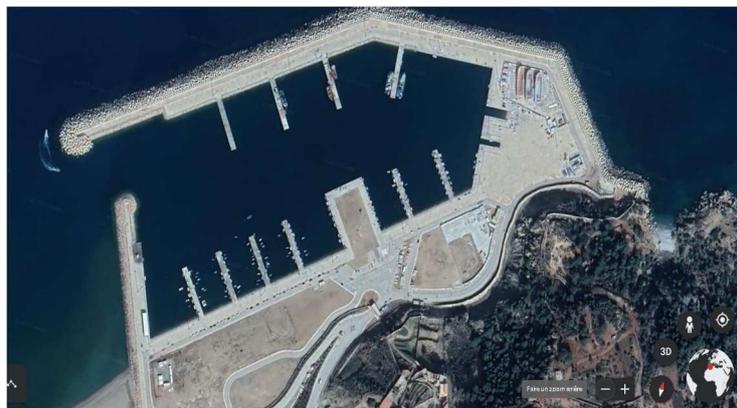


**Figure II. 1:Carte satellite SIDI OUCHAA**

### II.2.1.2 Evaluation de la consommation

Dans le cas de notre étude concernant le port de SIDI OUCHAA, le site ne dispose que de l'éclairage public, car il est en cours de construction et ne dispose actuellement d'aucune infrastructure.

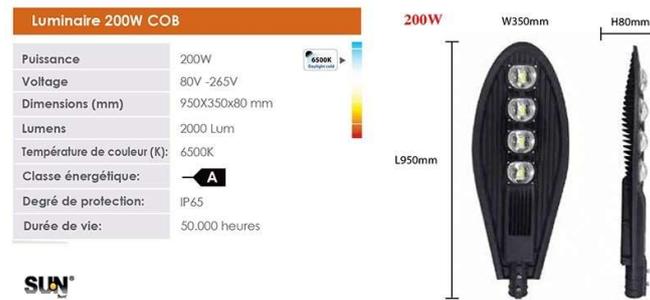
La figure ci-dessous présente le nombre des poteaux à utiliser dans l'éclairage public du port de SIDI OUCHAA qu'égal à 12 poteaux.



**Figure II. 2:Vue par Google Earth**

Nous avons procédé à une évaluation préliminaire de la consommation énergétique dans le cadre de notre étude en optant pour des luminaires à LED du modèle **200 W COB**. Par la suite, nous avons effectué le calcul de la consommation d'énergie pour l'éclairage public.

## Chapitre II Généralités sur le système d'énergie hybride



**Figure II. 3:Caractéristiques du LED choisi**

Le tableau ci-dessous présente la consommation journalière moyenne d'énergie pour chaque mois de l'année, basée sur une estimation de la puissance consommée par un seul poteau, multipliée par le nombre de poteaux dans le port (12 poteaux électriques), puis multipliée par le nombre d'heures d'utilisation quotidienne approximative pour chaque mois. Ainsi, nous obtenons finalement la consommation moyenne correspondant à chaque jour de mois de l'année.

**Tableau II. 1:Evaluation de la consommation**

Mois	Puissance (W)	Nombre appareils	Heure utilisation / jour (h)	Consommation (Wh/jour)
<b>Janvier</b>	200	12	12h	28 800
<b>Février</b>	200	12	12h	28 800
<b>Mars</b>	200	12	10h	24 000
<b>Avril</b>	200	12	10h	24 000
<b>Mai</b>	200	12	10h	24 000
<b>Juin</b>	200	12	8h	19 200
<b>Juillet</b>	200	12	7h	16 800
<b>Aout</b>	200	12	7h	16 800
<b>Septembre</b>	200	12	8h	19 200
<b>Octobre</b>	200	12	9h	21 600
<b>Novembre</b>	200	12	10h	24 000
<b>Décembre</b>	200	12	10h	24 000

## Chapitre II Généralités sur le système d'énergie hybride

<b>Totale</b>				271200
---------------	--	--	--	--------

**La moyenne de la consommation :  $271200 / 12 = 22600$  Wh/jour**

### II.2.1.3 Estimation de l'ensoleillement sur le site de l'installation du générateur PV

Les données d'ensoleillement (en kWh/m<sup>2</sup> /j) peuvent être lu sur le site ou enregistré sur une carte d'ensoleillement de la région ou obtenu de la station météo la plus proche de la région. Afin d'avoir une autonomie complète et d'éviter les variations saisonnières de consommation, il faut choisir comme référence l'ensoleillement du mois ensoleillé [20].

#### En Algérie :

L'éclairement : 4.92KW/m<sup>2</sup>/jour.

La durée d'ensoleillement journalière minimale est de : **2 h/jour**.

La durée d'ensoleillement journalière maximale est de : **8h/jour**.

En général on prend la moyenne **de : 5 h/jour** [21].

### II.2.1.4 L'angle d'inclinaison optimale pour le panneau

L'angle d'inclinaison optimal d'un panneau solaire dépend de la latitude de l'endroit où il est installé et de la saison. En général, pour maximiser la production d'énergie solaire, le panneau doit être incliné à un angle égal à la latitude moins 10 degrés en hiver et égal à la latitude plus 10 degrés en été.

Cependant, il est important de noter que les toits inclinés standard ont généralement une inclinaison de 30 à 45 degrés, ce qui peut être suffisant pour une production d'énergie solaire efficace tout au long de l'année dans de nombreuses régions.

Dans notre cas latitude de port SIDI OUCHAA est « 35,12337° ou 35° 7' 24" nord » donc l'angle d'inclinaison en hiver est 25° et en été est 45°.

## II.2.2 Présentation du système

### II.2.2.1 Stratégie de fonctionnement

Dans le cadre de cette étude, notre attention se porte spécifiquement sur l'analyse du système hybride PV Diesel commuté.

## Chapitre II Généralités sur le système d'énergie hybride

Les performances de ce système d'énergie hybride sont influencées par le choix de la stratégie de fonctionnement adoptée. Dans notre cas, la priorité de ce système réside dans la satisfaction de la demande énergétique en utilisant l'énergie produite par le champ photovoltaïque, tandis que la batterie agit comme un tampon pour absorber les surplus d'énergie en cas de surproduction et restituer l'énergie accumulée lorsque la production est insuffisante.

En se basant sur l'état de charge, l'onduleur chargeur contrôle l'activation du groupe électrogène pour répondre à des besoins énergétiques plus importants. Cette configuration améliore considérablement le rendement du système et prolonge la durée de vie des batteries en limitant leur décharge d'énergie. Une exploitation optimale et régulière du générateur diesel est nécessaire pour minimiser la consommation de combustible. L'onduleur chargeur ajuste en permanence la puissance du générateur diesel en fonction de la variation de puissance requise par les consommateurs.

En somme, les principales fonctions du système sont les suivantes :

- ✓ Assurer en permanence la sécurité de fonctionnement du système pour garantir une alimentation électrique fiable aux consommateurs.
- ✓ Minimiser les coûts de carburant et d'entretien.
- ✓ Optimiser la durée de vie des batteries et du générateur.

Dans les systèmes d'alimentation électrique déconnectés du réseau conventionnel, l'extensibilité et le type de couplage des différents composants jouent un rôle essentiel. Étant donné que les charges à alimenter fonctionnent exclusivement en courant alternatif, deux architectures sont possibles:

- l'architecture mixte à couplage CC/AC
- l'architecture à couplage AC.

### II.2.2.2 Système à couplage CC/AC

Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus [22] : le bus du courant continu pour les sources et charges à courant continu et les batteries, et le bus du courant alternatif pour les générateurs et charges à courant alternatif. Les sources d'énergies renouvelables peuvent être connectées au bus CC ou au bus AC en fonction de la dimension et la configuration du système. L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée par l'intermédiaire d'un onduleur/redresseur ou d'un convertisseur bidirectionnel. L'architecture à

## Chapitre II Généralités sur le système d'énergie hybride

deux bus est présentée à la figure II.4 Dans cette configuration, les batteries se chargent à la fois à partir du bus AC et du bus DC.

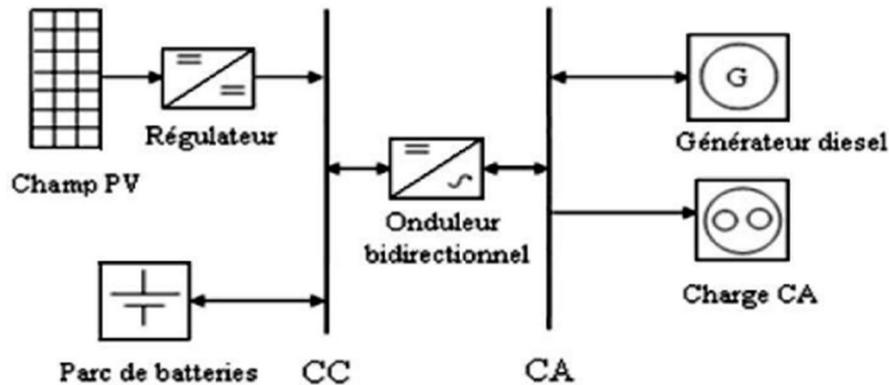


Figure II. 4: Architecture à deux bus CC/AC [23].

### II.2.2.3 Système à couplage AC

Dans cette architecture, toutes les sources de production sont reliées à un bus AC via des convertisseurs sauf le générateur diesel. Ce système a été développé par l'Institut National de l'Energie Solaire (ISET) de l'Université de Kassel et par l'entreprise SMA technologie AG pour l'électrification des zones rurales [1].

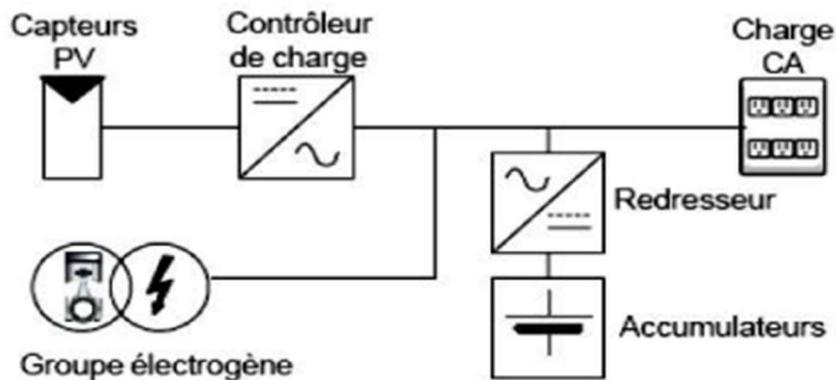


Figure II. 5: Architecture à couplage AC [1].

### II.2.3 Dimensionnement du système de génération photovoltaïque

Cette étape consiste à calculer la quantité de modules photovoltaïques que l'on devra posséder pour couvrir ces besoins en électricité. Il faut pour cela [24] :

## Chapitre II Généralités sur le système d'énergie hybride

### II.2.3.1 Puissance crête

La puissance crête est la puissance électrique maximale que peut produire un module photovoltaïque dans des conditions standardisées, c'est-à-dire lorsqu'il est exposé à une irradiation solaire de 1000 watts par mètre carré ( $W/m^2$ ), avec une température de cellule de 25 degrés Celsius et un spectre solaire AM 1,5. La puissance crête est exprimée en watts crête ( $W_c$ ). Elle est généralement indiquée par le fabricant du module photovoltaïque et représente une mesure importante de la performance de l'équipement. Il est important de noter que la puissance crête ne correspond pas nécessairement à la puissance de sortie réelle du module photovoltaïque en fonctionnement normal, car les conditions réelles peuvent varier considérablement de celles des conditions standardisées. Cependant, la puissance crête est utilisée comme une référence pour comparer les performances des différents modules photovoltaïques sur le marché.

Elle est donnée par la formule ci-dessous :

$$P_{ch} = \frac{E_c}{k \times I_r}$$

$P_{ch}$  : Puissance crête de champs photovoltaïques ( $W_c$ )

$E_c$  : Energie consommée par jour (Wh/jour)

$I_r$  : Temps moyen d'ensoleillement journalier (h/jour)

En Algérie :  $2 \leq I_r \leq 8$ . On prend la moyenne de 5 h/Jour  $k$  : Coefficient correcteur, ce coefficient tient compte :

- ✓ De l'incertitude météorologique.
- ✓ De l'inclinaison non corrigée des modules suivant la saison.
- ✓ Du point de fonctionnement des modules.
- ✓ Du rendement moyen charge/décharge de la batterie (90%).
- ✓ Du rendement de régulateur (95%).
- ✓ Pertes de câble et de connexion pour les systèmes avec batteries.  $k$  est généralement compris entre 0,55 et 0,75. Une valeur courante pour les calculs du système de batterie est  $k = 0,65$  [25]

## Chapitre II Généralités sur le système d'énergie hybride

### II.2.3.2 Nombre de panneaux

Le nombre de panneaux est nécessaire à installer est :

$$N_p = \frac{P_{Ch}}{\text{Puissance crête unitaire de panneau}}$$

Avec :

$N_p$  : Nombre des panneaux nécessaire

$P_{Ch}$  : Puissance crête totale.

#### II.2.3.2.1 Nombre de panneaux en série

$$N_{ps} = \frac{V_{Ch}}{\text{Tension délivrée par un panneau}}$$

Avec :

$V_{Ch}$  : Tension totale du champ.

#### II.2.3.2.2 Nombre de panneaux en parallèle

$$N_{pp} = \frac{N_p}{N_{ps}}$$

Avec :

$N$  : Nombre total de panneaux photovoltaïques

$N_p$  : Nombre de panneaux connectés en série

#### II.2.3.3 La taille de la surface du champ photovoltaïque

La surface d'un générateur PV est l'aire totale occupée par les panneaux solaires montés en série et en parallèles qui composent le champ photovoltaïque. La surface du générateur photovoltaïque s'exprime en fonction de la surface du module (SM), du nombre des modules en série (NMS) et le nombre des modules en parallèle (NMP) sous la forme suivante :

$$\text{Surface} = NMP \times NMS \times SM$$

Avec :

## Chapitre II Généralités sur le système d'énergie hybride

**SM** : Surface du module (m<sup>2</sup>)

**NMS** : Nombre des modules en série

**NMP** : Nombre des modules en parallèle

### II.2.3.4 La tension de fonctionnement du champ photovoltaïque

La tension est choisie selon la valeur de la puissance crête de la manière suivante :

**Tableau II. 2 : Tension du champ en fonction de sa puissance crête**

<b>Puissance crête (Wc)</b>	$\leq 500$	$500 < P_c \leq 2000$	$2001 < P_c \leq 10000$	$> 10000$
Tension de système (V)	12	24	48	96

### II.2.4 Dimensionnement de générateur diesel

Le groupe diesel est le plus souvent dimensionné pour couvrir le pic de consommation des appareils, Cependant il est aussi important de dimensionner le groupe de façon à le faire fonctionner à son point maximal, compris entre 70 et 90% [26].

Le choix de la puissance nominale d'un groupe électrogène doit être supérieur à la puissance moyenne de consommation du site pour éviter toute surcharge et endommagement des appareils. Cependant, il est important de ne pas choisir un groupe électrogène surdimensionné, car cela peut entraîner une consommation excessive de carburant par rapport aux besoins réels. Ainsi, il est essentiel de trouver un équilibre afin de garantir un fonctionnement sûr et efficace du groupe électrogène tout en optimisant la consommation de carburant.

Le groupe électrogène doit avoir une puissance nominale supérieure aux pics de consommation et aux besoins de démarrage de la charge. Pour notre site, nous avons choisi un groupe électrogène d'une puissance de 80 kW.

La puissance du groupe diesel fournie au réseau est proportionnelle à la puissance nominale [27] :

## Chapitre II Généralités sur le système d'énergie hybride

$$P_{nGD} \times k_s = E_{GD} / \Delta_t$$

$E_{GD}$  = énergie du GD sur une journée.

$\Delta_t$  = temps de marche de GD sur une journée.

$k$ : Coefficient de sécurité lié aux différentes pertes dans le mini - réseau.

### II.2.5 Système de stockage

Dimensionner la batterie va nous permettre de choisir le dispositif de stockage qui répond au besoin énergétique durant la nuit [28].

#### II.2.5.1 Energie et capacité de stockage

Le choix de la batterie pour un système photovoltaïque dépend de plusieurs facteurs, tels que la taille du système, la quantité d'énergie stockée souhaitée, le nombre de cycles de charge-décharge attendus, la profondeur de décharge, la tension de la batterie, la durée de vie attendue, le coût et les conditions d'environnement.

Chacun de ces facteurs est définis comme suit :

- **Tension de la batterie** : La tension de la batterie doit correspondre à celle du système photovoltaïque pour assurer une compatibilité optimale.
- **Profondeur de décharge (DOD)** : Il est important de choisir une batterie qui a une profondeur de décharge appropriée pour les besoins du système et qui peut supporter le nombre de cycles de charge-décharge attendus.
- **Capacité** : La capacité de la batterie détermine la quantité d'énergie qui peut être stockée. Plus la capacité est élevée, plus l'autonomie du système est grande. Cependant, il est important de tenir compte des besoins en énergie du système et de choisir une capacité qui convient à ces besoins.

La capacité nominale d'une batterie est donnée par la formule ci-dessous :

$$C_{ch} = \frac{E_c \times N}{D \times U}$$

Avec :

$C_{ch}$  : Capacité du champ de batterie en Ampère. Heure (Ah).

## Chapitre II Généralités sur le système d'énergie hybride

$E_c$  : Energie consommée par jour (Wh/j).

$N$  : Nombre de jour d'autonomie.

$D$  : Décharge maximale admissible (0,8 pour les batteries au plomb).

$U$  : Tension de la batterie (V).

### II.2.5.2 Nombre de batterie

Le nombre de batteries nécessaire est calculé comme suite :

$$N_T = \frac{C_{acc}}{C_b}$$

Avec :

$C_{ac}$ :Capacité de la batterie de stockage (Ah) ou (Wh)

$C$ : Capacité batterie, (Ah)

#### II.2.5.2.1 Nombre de batteries en série

$$N_{bats} = \frac{V_{ch}}{V_{bat}}$$

Avec :

$V_{ch}$  : Tension totale du champ photovoltaïque

$V_{bat}$  : La tension délivré par la batterie

#### II.2.5.2.2. Nombre de batteries en parallèle

$$N_{batp} = \frac{N_T}{N_{bats}}$$

Avec :

$N_T$  : Le nombre de batterie total

$N_{bats}$  : Le nombre de batterie en série

## Chapitre II Généralités sur le système d'énergie hybride

### II.2.6 Régulateur

Le dimensionnement d'un régulateur de charge solaire est important pour garantir la durée de vie du système solaire et la performance des batteries [29].

Il est dimensionné en fonction de quelques paramètres tels que [29] :

- La tension nominale : doit être la tension du champ photovoltaïque
- Le courant d'entrée : Le courant d'entrée est le courant de charge maximal que les modules sont susceptibles de fournir. Mais par mesure de sécurité il est préférable de prendre 1,5 fois le courant maximal.
- Le courant de sortie : Le courant de sortie du régulateur doit être supérieur à la valeur maximale de puissance (P) que peuvent consommer les appareils alimenter simultanément.

$$I_s = \frac{P_{ch}}{U}$$

$P_{ch}$  : La puissance crête du champ photovoltaïque qui est calculé comme suit :

$$P_{ch} = P_c \times N_p$$

$P$ : La puissance crête d'un panneau photovoltaïque

$N_p$  : Nombre de modules du champ photovoltaïques

### II.2.7 Convertisseurs

Le dimensionnement de l'onduleur consiste à choisir le modèle d'onduleur le plus approprié pour un système d'énergie solaire. Il est important de s'assurer que l'onduleur est suffisamment puissant pour convertir l'énergie produite en électricité de qualité et stable [29].

Le choix d'un onduleur solaire dépend de plusieurs critères importants, tels que [29] :

- **La Tension d'entrée** : elle est égale à celle de la batterie ou du régulateur.

- **La tension de sortie** : afin que notre installation fonctionne normalement, l'onduleur doit produire une tension de sortie correspondant à la tension d'alimentation en courant alternatif des charges utilisées, qui est de 220/230 VAC.

## Chapitre II Généralités sur le système d'énergie hybride

- **La puissance nominale** : en fonction des besoins exprimés, la puissance nominale de l'onduleur (exprimée en VA) est déterminée en prenant en compte le nombre d'équipements à alimenter et leur puissance respective.

### II.2.8 Les câbles

La performance globale des systèmes PV dépend fortement du choix correct des câbles. Pour faire ce choix il faut prendre en considération quelques mesures bien définies [30] :

#### II.2.8.1 La longueur

La longueur des câbles est certainement l'aspect le plus important à considérer. En effet, des câbles trop longs ou trop courts peuvent être à la source de plusieurs dysfonctionnements. Ils peuvent provoquer une surchauffe pouvant endommager l'installation photovoltaïque. Ou encore des chutes de tension qui réduisent le rendement énergétique. Pour choisir la bonne longueur, il faudra prendre en compte la distance entre les différents éléments de l'installation ainsi que la tension et l'intensité du courant acheminé [30].

#### II.2.8.2 La section

Mises à part les pertes dans les appareils d'interfaces (convertisseurs ; batteries.) qui sont représentées par le rendement de chaque appareil, il y a les pertes de puissance par effet joule dans les conducteurs ohmiques. C'est sur la partie courant continu (CC) que les courants sont importants ce qui provoque les pertes d'énergie et les chutes de tension, d'où l'importance du dimensionnement des câbles (section). Pour des sections mal dimensionnées il y aura plus de pertes d'énergie, d'économie, chauffage des câbles etc. [31].

#### II.2.8.3 Connecteur

Les câbles solaires peuvent intégrer des connecteurs afin de garantir une connexion parfaite lors de leur raccordement. Si tel est le cas, il est important de s'assurer qu'ils soient d'une qualité irréprochable, toujours dans le but d'éviter les chutes de tension et autres dysfonctionnements. Les connecteurs se doivent d'être résistants aux intempéries, aux températures extrêmes et aux rayons UV [30].

## Chapitre II Généralités sur le système d'énergie hybride

### II.2.8.4 Résistivité

C'est une grandeur physique propre à un matériau conducteur. Elle définit sa capacité à conduire plus ou moins bien le courant électrique.

Pour un objet de résistivité  $\rho$ , d'aire en coupe transversale  $A$ , et de longueur  $l$ , la résistance  $R$ , est donnée par :

$$R = \frac{\rho \times l}{A}$$

Avec :

: La résistance en ( $\Omega$ )

: La résistivité en ( $\Omega.m$ )

: La longueur du câble en (m)

: La section du câble  $s$  en ( $mm^2$ )

### Conclusion

Dans ce chapitre de dimensionnement du système hybride PV/diesel, nous avons présenté en détail le site de l'installation, évalué la consommation énergétique à 22,6 kWh/jour et estimé l'ensoleillement sur le site. Le dimensionnement du générateur photovoltaïque a été réalisé en prenant en compte la puissance crête, le nombre de panneaux, la tension de champ et la surface nécessaire.

De plus, nous avons dimensionné le générateur diesel pour assurer un soutien fiable en cas de production insuffisante d'énergie solaire. Le système de stockage a été dimensionné en termes de capacité et de nombre de batteries, tandis que les régulateurs, convertisseurs et câbles ont été considérés pour une intégration et une gestion efficaces de l'énergie. Ce chapitre permet d'obtenir des spécifications techniques précises pour chaque composant, garantissant ainsi une conception optimale adaptée aux besoins du site.

# ***Chapitre III***

***Simulation du système par HOMER Pro***

## Chapitre III Simulation du système par Homer

### Chapitre III : Simulation du système par HOMER Pro

Les systèmes d'énergie hybride (SEH) tirent parti de diverses sources d'énergie telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire photovoltaïque et les générateurs diesel. Ces systèmes sont souvent considérés comme une solution viable pour les régions éloignées. Ce chapitre présente l'architecture du SEH qui a été élaborée suite à une étude de dimensionnement approfondie. L'architecture comprend des panneaux solaires photovoltaïques, un générateur diesel, un système de stockage et des convertisseurs permettant d'interconnecter les différentes sources d'énergie. Le dimensionnement d'un tel système implique la détermination des caractéristiques nominales des sources d'énergie et du système de stockage, en prenant en compte les ressources énergétiques disponibles ainsi que les contraintes d'utilisation spécifiques. Dans ce contexte, le logiciel HOMER est utilisé pour effectuer le dimensionnement précis du système.

### III.1 Présentation du logiciel

Le logiciel HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) est un logiciel de simulation et d'optimisation conçu pour concevoir et analyser des systèmes hybrides de production d'électricité (PV, GE, batterie, éolien). Il a été développé en 1993 par le NREL américain (National Renewable Energy Laboratory). Il vous permet d'analyser et de combiner différentes sources d'énergie pour montrer la meilleure configuration [32].

Le modèle doit comprendre les ressources disponibles, les options technologiques, les coûts et les charges que le système doit prendre en compte. HOMER Pro utilise ces entrées pour simuler différentes configurations de systèmes ou combinaisons de composants et génère des résultats qui peuvent être analysés sous la forme d'une liste de configurations réalisables triées par coût actuel net. Les composants pouvant être modélisés dans les différentes configurations sont les modules photovoltaïques, les éoliennes, les générateurs diesel, les batteries, les convertisseurs AC/DC, les électrolyseurs, les reformeurs, les réservoirs d'hydrogène [32], [33]. La mission d'HOMER Pro est de simplifier la tâche de conception des systèmes de production distribuée (distributed generation DG) - à la fois sur et hors réseau. Les algorithmes d'optimisation et d'analyse de sensibilité d'HOMER Pro permettent d'évaluer la faisabilité économique et également technique d'un grand nombre d'options technologiques et de tenir compte des variations des coûts actuels des technologies et de la disponibilité des ressources énergétiques [34], [21].

### III. 1 Caractéristiques du port de SIDI OUCHAA

Le site étudié dans cette thèse est le port de SIDI OUCHAA. La figure ci-dessous illustre l'emplacement de cet endroit :



**Figure III. 1:Vue de SIDI OUCHAA par Google Earth**

### III.2 Simulation du système

Dans cette partie on va lancer la simulation par le logiciel HOMER Pro. Lorsque HOMER Pro démarre, et on peut maintenant entrer le nom du projet, l'auteur et une petite description du projet. Ensuite on sélectionne l'emplacement du projet ou alors on peut entrer l'adresse de l'emplacement dans la barre de recherche. Dans l'écran d'accueil au-dessous s'affiche quatre entrées clés : le taux d'actualisation, le taux d'inflation, le déficit de capacité annuel maximum et la durée de vie du projet. La zone fonctionnelle contient six onglets : Charge, Composants, Ressources, Projets, Système et Aide. Cependant, l'interface HOMER Pro est organisée en : Conception, Résultats et Bibliothèques [35].

## Chapitre III Simulation du système par Homer

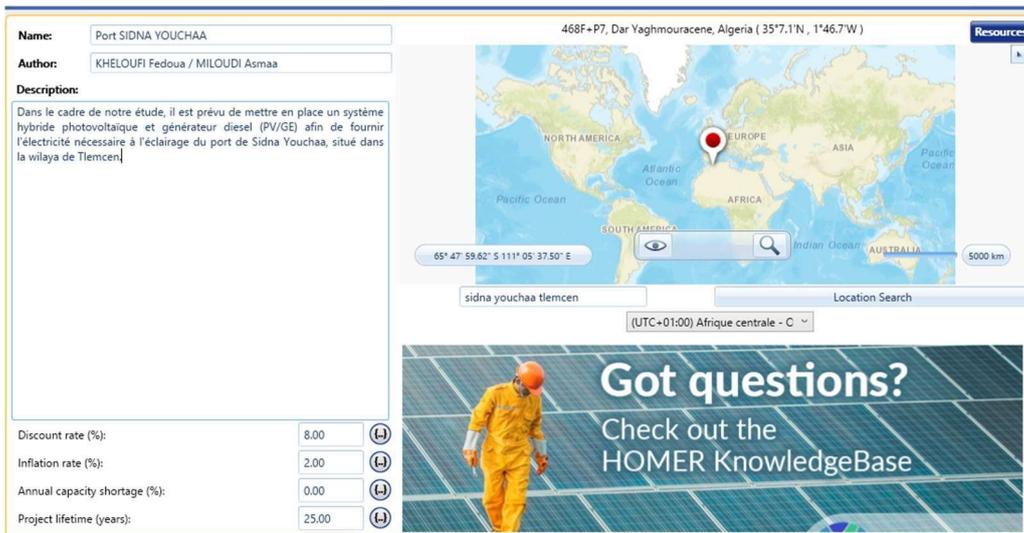


Figure III. 2: Écran d'accueil HOMER Pro.

### III. 3 Profil de charge

Le dimensionnement du système de production d'énergie électrique repose sur l'évaluation prévisionnelle de la consommation journalière du site. Dans cette étape, les données détaillées de la consommation journalière en énergie que nous avons déjà calculée dans le chapitre précédent sont introduites dans le logiciel HOMER Pro, en spécifiant les valeurs de consommation pour chaque heure de travail de la charge. Par la suite, HOMER Pro procède à la traduction de ces données en courbes de charge, tel qu'illustré dans la figure ci-dessous.

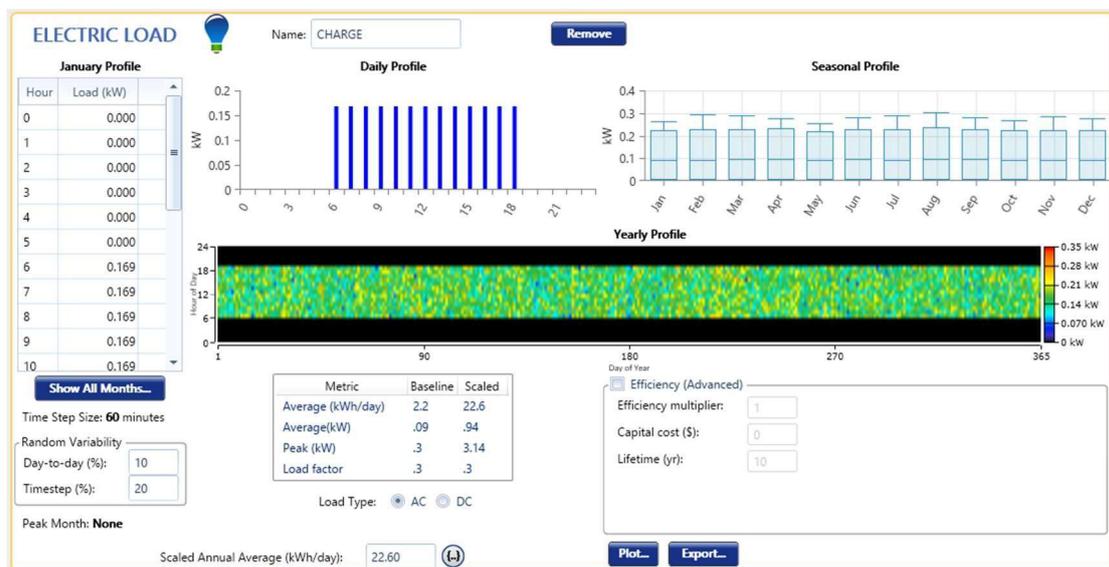
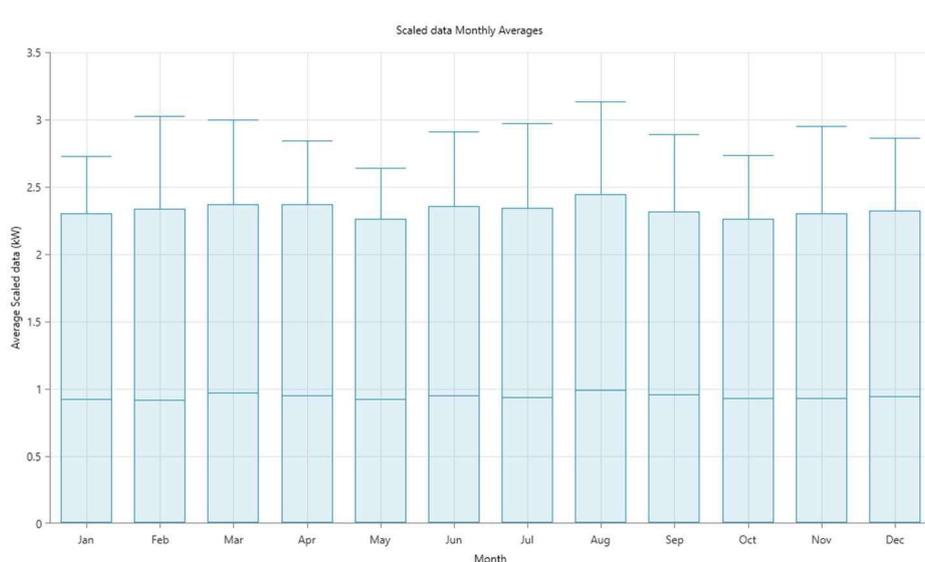


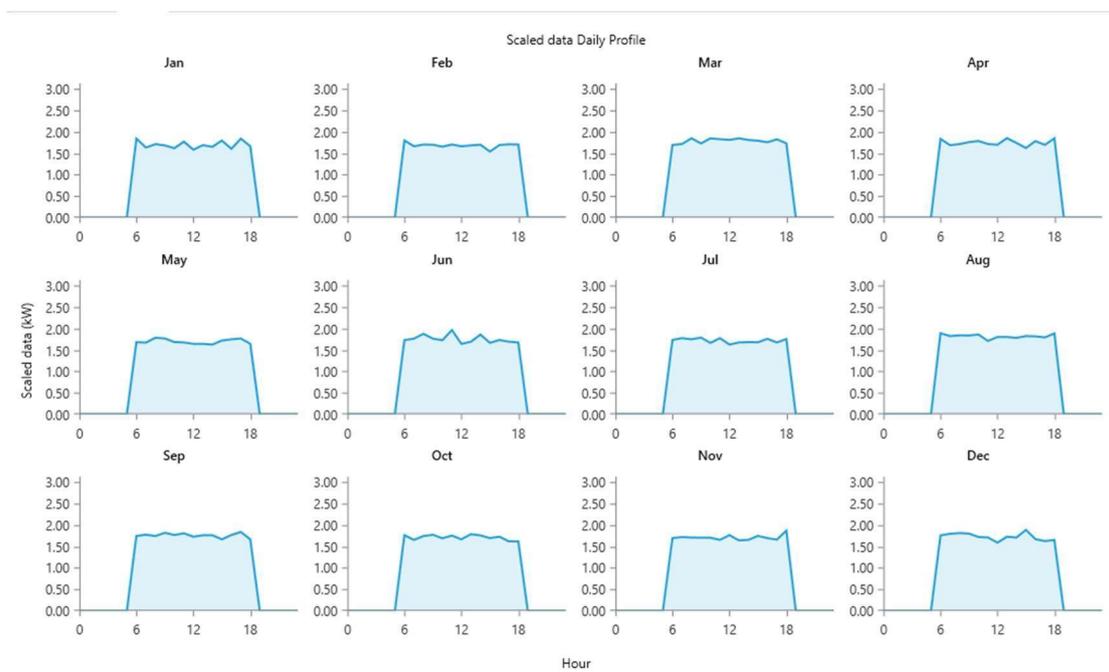
Figure III. 3: Profil de charge saisie dans HOMER Pro.

## Chapitre III Simulation du système par Homer

HOMER Pro convertit les données que nous avons introduites en graphiques, nous fournissant ainsi le profil de charge annuel et journalière telle que le premier graphe (**Figure III.4**) représente le profil de charge mensuel, qui montre la consommation pour chaque mois de l'année et le deuxième graphe (**figure III.5**) représente le profil de charge quotidien, qui illustre la répartition de la consommation quotidienne en fonction des heures d'utilisation pour chaque mois.



**Figure III. 4: Profil de charge annuelle**



**Figure III. 5: Profil de charge journalier suivant les saisons.**

## Chapitre III Simulation du système par Homer

L'illustration montre 12 graphes représentant la consommation d'énergie électrique de l'éclairage public pour chaque mois de l'année. Les graphes présentent une courbe similaire, mais avec une consommation plus élevée pendant les mois d'hiver, notamment la nuit. Cette variation saisonnière peut être due aux jours plus courts et aux conditions météorologiques défavorables. Il est important de planifier et de gérer efficacement l'éclairage public en tenant compte de ces variations pour une utilisation plus durable de l'énergie. Des études plus approfondies sont nécessaires pour des recommandations précises.

### III.4 Évaluation des ressources et collecte de données

#### III.4.1 Ressources solaire :

Les stations météorologiques enregistrent l'irradiance totale sur les surfaces horizontales, également connue sous le nom d'irradiance globale horizontale (GHI). D'autre part, GHI représente la somme du rayonnement solaire directement incident sur la surface de la Terre et de l'irradiance horizontale diffuse (DHI). C'est un paramètre important pour la conception de systèmes photovoltaïques. L'irradiance horizontale diffuse est le rayonnement du soleil qui ne frappe pas directement la surface de la Terre, mais qui est diffusé par des molécules, des nuages, de la poussière ou d'autres particules dans l'atmosphère terrestre et qui provient de toutes les directions. Les résultats sur les ressources solaires de la zone étudiée sont obtenus à partir de la base de données NASA World Energy Ressources Projection (POWER) [36].

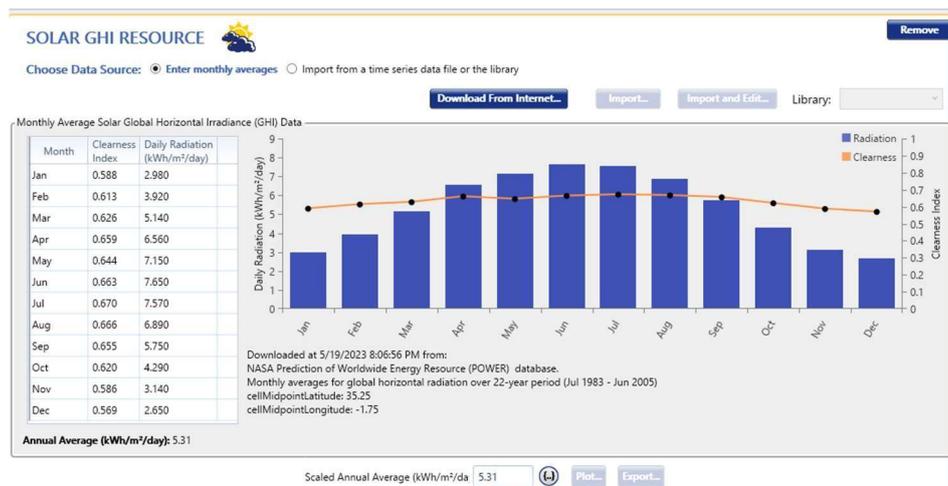


Figure III. 6: L'irradiation quotidienne dans la zone étudiée (port de SIDNA YOUCHAA).

## Chapitre III Simulation du système par Homer

Le graphe de l'irradiation journalière dans le port de SIDNA YOUCHAA met en évidence des tendances claires. Les mois de juillet et juin présentent une irradiation maximale en raison de la période la plus chaude de l'année. En décembre, l'irradiation est la plus basse en raison de journées plus courtes et d'une intensité solaire réduite pendant l'hiver. La moyenne annuelle mise à l'échelle est de 5.31 kWh/m<sup>2</sup>/jour, indiquant la quantité moyenne d'énergie solaire reçue par unité de surface chaque jour tout au long de l'année. Ces variations soulignent l'importance de prendre en compte les fluctuations saisonnières dans la planification des systèmes solaires. Des études plus détaillées, incluant des données météorologiques spécifiques et des modèles de rayonnement solaire, sont nécessaires pour évaluer précisément le potentiel solaire de la région du port de SIDNA YOUCHAA.

### III.4.2 Température ambiante

Il est essentiel de prendre en considération la température dans un système photovoltaïque en raison de son impact significatif sur les performances et l'efficacité du système. La température élevée peut entraîner une diminution de la production d'énergie photovoltaïque en provoquant une augmentation de la résistance interne des cellules solaires. Cela peut entraîner une diminution de la tension de sortie et une réduction de l'efficacité globale du système. De plus, la température peut également affecter la durée de vie des composants du système, tels que les onduleurs et les câbles, en les exposant à des conditions de chaleur qui peuvent accélérer leur dégradation. Par conséquent, il est crucial de surveiller et de prendre en compte la température du site étudié afin de maximiser les performances et la durabilité d'un système photovoltaïque :

- La température moyenne : 18.28.

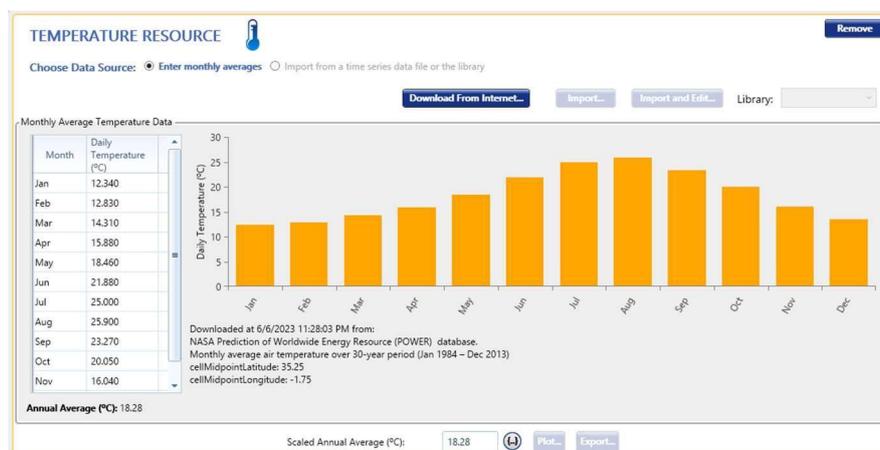


Figure III. 7: la température ambiante moyenne mensuelle du site

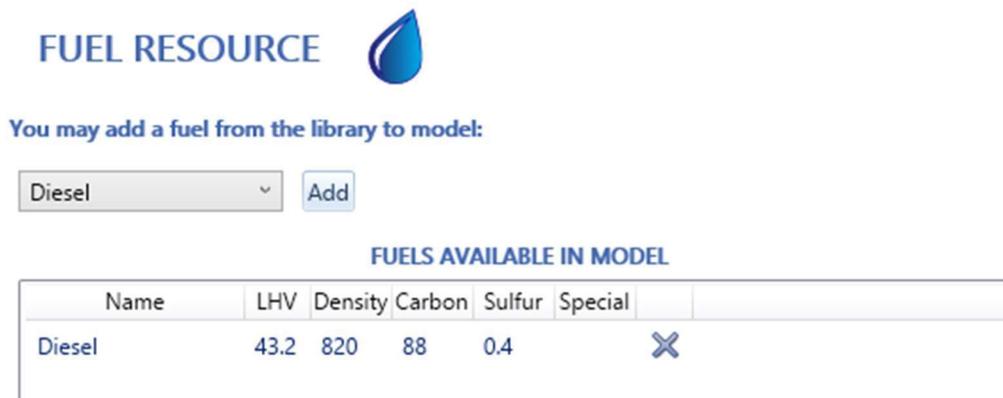
## Chapitre III Simulation du système par Homer

### III.4.3 Donné sur le carburant Diesel

Le pouvoir calorifique inférieur (LHV) est une caractéristique des combustibles qui mesure la quantité de chaleur lib r e lors de la combustion complète d'une unité de combustible. Dans notre étude , le LHV est égal à 43,2.

La densité est une mesure du poids d'un produit par unité de volume donnée. Elle peut varier en fonction de la température du produit.   une température de 15 C, la densité moyenne est d'environ 830 kg/m<sup>3</sup> (830 kg pour 1 m<sup>3</sup>). Dans notre cas, la densité est de 820 kg/m<sup>3</sup>.

Le fioul   très basse teneur en soufre est un type de fioul lourd dont la quantité de soufre massique est inférieure à un certain pourcentage. Dans notre cas, le pourcentage de soufre est de 0,4%.



**FUEL RESOURCE** 

You may add a fuel from the library to model:

Diesel

**FUELS AVAILABLE IN MODEL**

Name	LHV	Density	Carbon	Sulfur	Special
Diesel	43.2	820	88	0.4	

Figure III. 8:carburant disponible dans le modèle

### III.5 Modélisation du système sous le logiciel HOMER

La modélisation du système dans HOMER consiste à créer le diagramme représentatif du système en sélectionnant les différents composants qui le constituent. La Figure (III.9) présente le schéma correspondant au l'architectures du système.

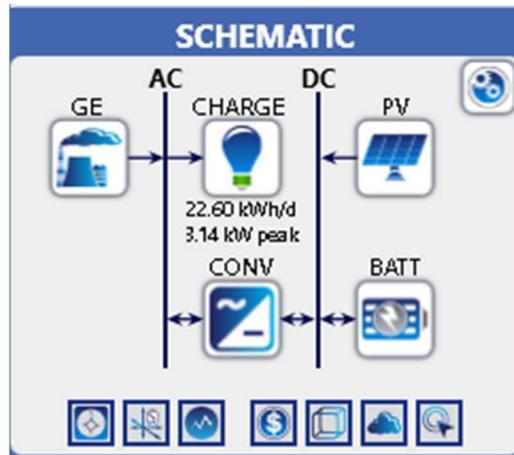


Figure III. 9:schéma du système hybride PV-diesel simulé par HOMER Pro

### III.5.1 Modélisation de panneaux solaires photovoltaïques

L'illustration présente une fenêtre de saisie sur le logiciel Homer Pro, utilisée pour renseigner les caractéristiques du panneau solaire Peimar SG360 M. Avec un rendement de module de 18.5%, ce panneau spécifique est sélectionné pour l'intégration dans la simulation. Cette fenêtre témoigne de la capacité du logiciel à tenir compte des spécificités des panneaux solaires choisis, permettant ainsi une modélisation plus précise et des résultats fiables. En fournissant ces informations, l'utilisateur peut obtenir une analyse adaptée et réaliste de son système solaire.

Figure III. 10:caractéristiques de module solaires photovoltaïques

### III.5.2 Modélisation de batteries solaires

Un système de stockage d'énergie, tel que des batteries, peut être intégré au système PV pour collecter et stocker l'énergie solaire produite pendant la journée. Cette énergie stockée peut ensuite être utilisée pendant la nuit pour alimenter les luminaires. Dans ce cas, le modèle de batterie sélectionné pour cette fonction est le KINETIC Battery Model, caractérisé par une tension nominale de 12 volts et une capacité de stockage de 206 ampères-heures. Le nombre de

## Chapitre III simulation du système par Homer Pro

batteries requis a été déterminé préalablement, conformément aux calculs réalisés dans le chapitre correspondant. Les spécifications détaillées de ces batteries sont fournies dans la Figure III.11:

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	410.00	410.00	0.00

Properties  
**Kinetic Battery Model**  
Nominal Voltage (V): 12  
Nominal Capacity (kWh): 3.11  
Maximum Capacity (Ah): 260  
Capacity Ratio: 0.563  
Rate Constant (1/hr): 0.176  
Roundtrip efficiency (%): 80  
Maximum Charge Current (A): 43  
[discoverbattery.com](http://discoverbattery.com)  
Capital cost and replacement cost represent hardware costs, but should be edited to include the cost of installation and logistics, etc.  
Max charge current is 20% of Ah capacity.

Cost  
Quantity: 1  
Capital (\$): 410.00  
Replacement (\$): 410.00  
O&M (\$/year): 0.00  
Lifetime  
time (years): 20.00  
throughput (kWh): 3,581.60

Sizing  
 HOMER Optimizer™  
 Search Space  
 Advanced

Site Specific Input  
Electrical Bus:  AC  DC  
String Size: 8 Voltage: 96.00 V  
Initial State of Charge (%): 100.00  
Minimum State of Charge (%): 20.00

Figure III. 11: Batterie choisie parmi les modèles de HOMER Pro

### III.5.3 Modélisation de convertisseur

Dans le cadre des installations photovoltaïques, l'onduleur couplé au réseau est utilisé pour convertir le courant continu produit par les modules solaires PV en un courant alternatif conforme aux spécifications du réseau électrique. Il assure également l'adaptation du courant produit à la fréquence et à la tension du réseau. L'installation d'un onduleur couplé au réseau nécessite l'approbation de l'organisme de distribution d'énergie électrique, garantissant ainsi la sécurité des opérations. Cet onduleur est conçu pour surveiller en permanence les perturbations et interrompre immédiatement l'injection d'électricité en cas de défaillance ou de coupure, permettant ainsi une intervention sécurisée sur le réseau. Pour notre modèle dans HOMER Pro, nous avons sélectionné le convertisseur Huawei SUN2000-150KTL-60 d'une puissance de 100 kW parmi les options disponibles. Les caractéristiques détaillées de ce convertisseur sont fournies dans la Figure III.12.

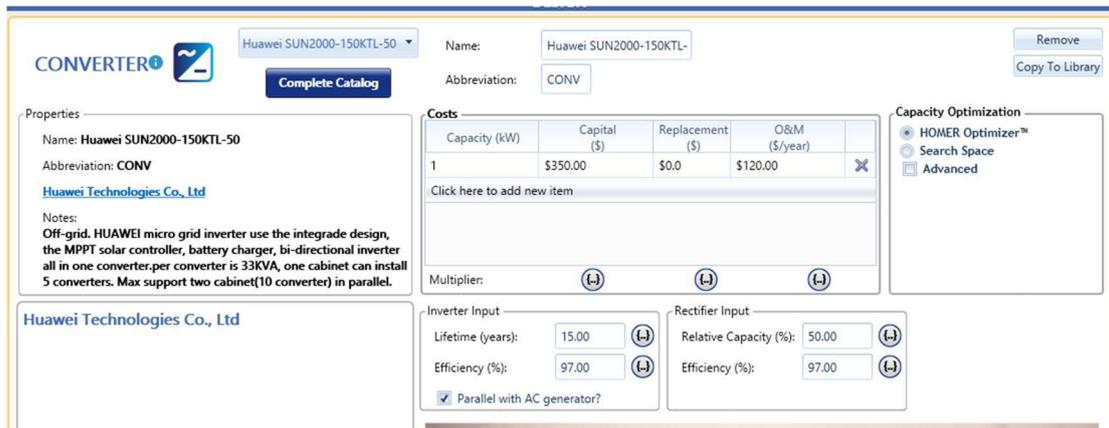


Figure III. 12: Convertisseur choisi parmi les modèles de HOMER Pro

### III.5.4 Modélisation du GE

Pour la modélisation du groupe électrogène, le modèle sélectionné est le CAT-100kVA-50Hz-pp, avec une capacité de 80 kW, adapté à nos besoins spécifiques.

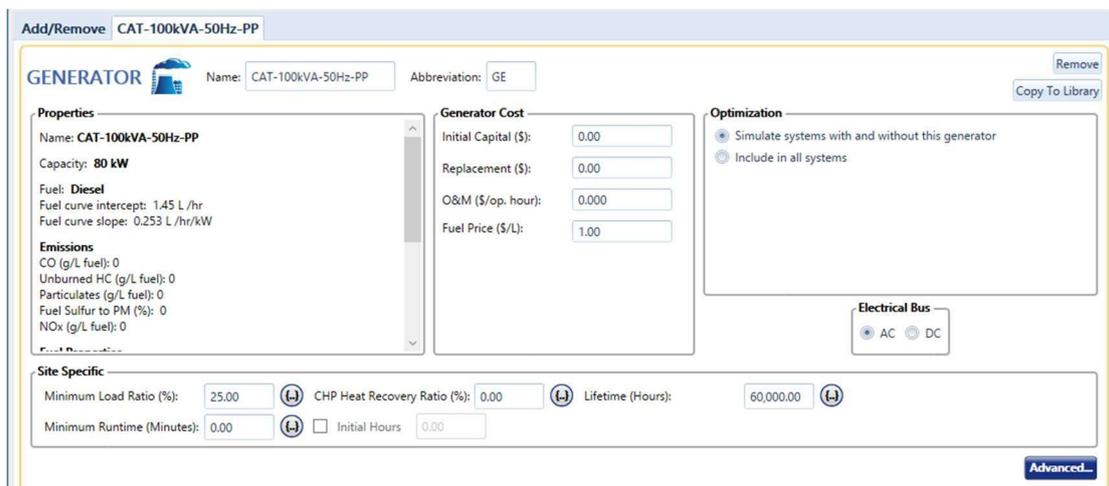


Figure III. 13: Paramètres réseau introduit dans le modèle de HOMER Pro

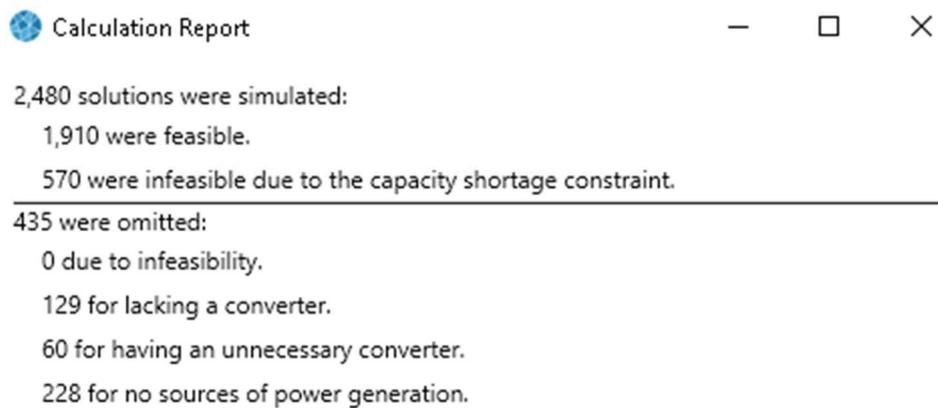
### III.6 Résultats et interprétations

HOMER produit des résultats qui peuvent être présentés sous forme d'une liste ordonnée de configurations possibles, triées en fonction de leur coût du cycle de vie. De plus, HOMER fournit des résultats détaillés de simulation, présentés sous forme de tableaux et de graphiques, qui permettent d'analyser et de visualiser les performances du système de génération dans ses différentes composantes. Les résultats des simulations englobent les aspects spécifiques de chaque partie du système de génération, offrant ainsi une compréhension approfondie de son fonctionnement et de son efficacité.

### III.6.1 Les solutions données par HOMER pro

le logiciel HOMER PRO a simulé un total de 2480 solutions possibles pour répondre aux exigences du système énergétique étudié. Parmi les 2480 solutions examinées, seules 1910 sont réalisables. Cependant, 570 configurations se sont avérées irréalisables en raison de contraintes de capacité spécifiques.

De plus, 435 configurations ont été omises lors de l'analyse : 129 en raison du manque de convertisseurs, 60 en raison de l'inutilité d'un convertisseur et 228 en raison de l'absence de sources d'énergie. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte les contraintes techniques et économiques lors de la sélection des configurations énergétiques optimales. La figure III.14 montre les résultats simulés :



**Figure III. 14: les nombre de solutions simulé par HOMER Pro**

Les configurations les plus optimales du système sont présentées dans la figure III.15, mais le système PV-DIESEL avec stockage est le système d'intérêt dans notre étude. Ce système combine l'énergie solaire du champ photovoltaïque qui délivre 11 KW, un générateur diesel qui génère une puissance de 80 kW, un système de stockage d'énergie qui contient 8 batteries et un convertisseur de 2.96 KW. L'objectif est d'optimiser l'utilisation de ces différentes sources pour assurer une alimentation électrique fiable, tout en réduisant les coûts et en augmentant l'efficacité énergétique.

## Chapitre III Simulation du système par Homer

Architecture							Cost				System		GE				
PV (kW)	GE (kW)	BATT	CONV (kW)	Dispatch	NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	Hours	Production (kWh)	Fuel (L)	O&M Cost (\$/yr)	Fuel Cost (\$/yr)	Capital C (\$)	
8.69		16	2.64	CC	\$17,926	\$0.190	\$370.44	\$13,137	100	0						5,651	
11.0	80.0	8	2.96	LF	\$18,142	\$0.192	\$515.42	\$11,479	94.8	124	19.0	380	124	0	124	7,163	
80.0		16	15.0	LF	\$123,486	\$1.31	\$8,639	\$11,810	0	6,357	978	19,560	6,357	0	6,357		
63.0	80.0		2.97	CC	\$158,483	\$1.68	\$9,011	\$41,989	0	8,782	1,351	27,020	8,782	0	8,782	40,950	
80.0				CC	\$398,717	\$4.22	\$30,843	\$0.00	0	30,842	4,745	94,900	30,842	0	30,842		

Figure III. 15: Les solutions les plus optimales

### Interprétation :

#### III.6.2 La production PV et la consommation du système

Le graphique associé à cette figure (Figures III.16) représente l'évolution de ces pourcentages sur une période d'un an, en mettant en évidence les variations mensuelles. Il permet d'observer comment la part de l'énergie photovoltaïque prédomine tout au long de l'année, tandis que la contribution du groupe électrogène reste relativement faible et constante. Cette représentation graphique permet d'appréhender visuellement la répartition saisonnière de la production d'énergie du système entre les sources photovoltaïques et le groupe électrogène.

Production	kWh/yr	%
Peimar SG360M	19,529	98.1
CAT-100kVA-50Hz-PP	380	1.91
Total	19,909	100

Consumption	kWh/yr	%
AC Primary Load	7,300	100
DC Primary Load	0	0
Deferrable Load	0	0
Total	7,300	100

Quantity	kWh/yr	%
Excess Electricity	12,021	60.4
Unmet Electric Load	0	0
Capacity Shortage	0	0

Quantity	Value	Units
Renewable Fraction	94.8	%
Max. Renew. Penetration	1,799	%

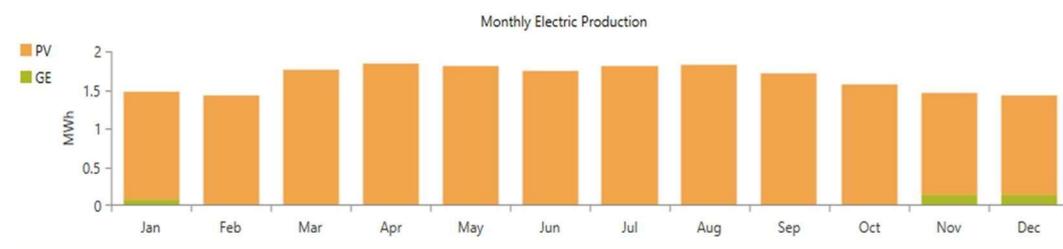


Figure III. 16: la production électrique totale mensuelle

La figure (Figures III.17) présentée sous forme de tableau indique que 98.1% de la production totale du système provient de l'énergie photovoltaïque, tandis que le groupe électrogène ne contribue qu'à hauteur de 1.91%. Cette répartition met en évidence la prédominance de l'énergie solaire dans la production d'électricité du système.

## Chapitre III Simulation du système par Homer

Production	kWh/yr	%
Peimar SG360M	19,529	98.1
CAT-100kVA-50Hz-PP	380	1.91
Total	19,909	100

Consumption	kWh/yr	%
AC Primary Load	7,300	100
DC Primary Load	0	0
Deferrable Load	0	0
Total	7,300	100

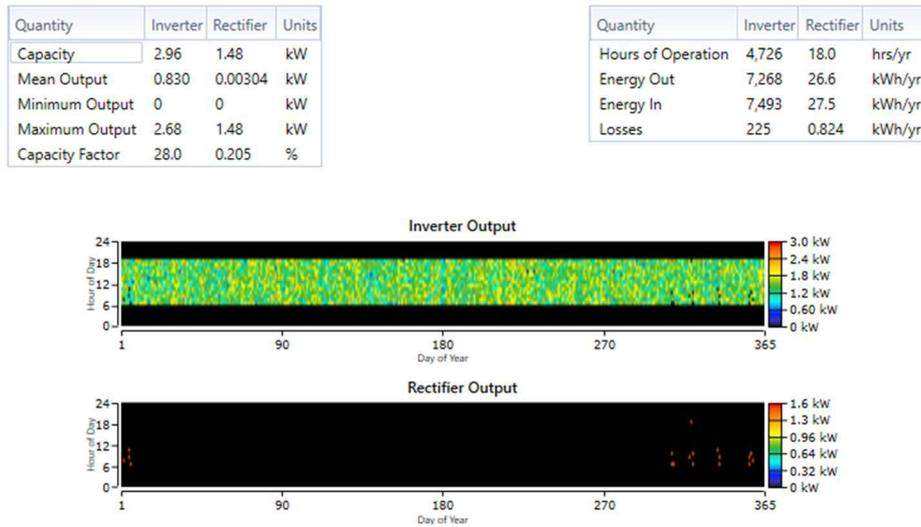
Figure III. 17: Energie électrique produite par le système

### III.6.3 Résultat de convertisseur

La simulation réalisée sur le logiciel HOMER PRO a fourni les résultats suivants pour le convertisseur choisi :

- ✓ **Capacité du convertisseur** : est de 2.96 kW. Cela indique que le convertisseur est capable de fournir une puissance maximale de 2.96 kW.
- ✓ **Facteur de capacité** : est de 28 %. Ce chiffre représente la moyenne de la production réelle par rapport à la capacité maximale sur une période donnée. Un facteur de capacité de 28 % suggère que le convertisseur a produit environ 28 % de sa capacité maximale pendant cette période.
- ✓ **Heures de fonctionnement** : Le convertisseur a fonctionné pendant 4.726 heures par an. Cette valeur indique la durée totale pendant laquelle le convertisseur a été en activité pendant une année.
- ✓ **Énergie entrante et sortante** : L'énergie entrante est de 7.493kWh par an, ce qui représente la quantité totale d'énergie consommée par le convertisseur au cours de cette période. L'énergie sortante est de 7.268 kWh par an, indiquant la quantité totale d'énergie produite par le convertisseur et fournie à la charge ou au réseau.

## Chapitre III Simulation du système par Homer



**Figure III. 18: Puissance de l'onduleur**

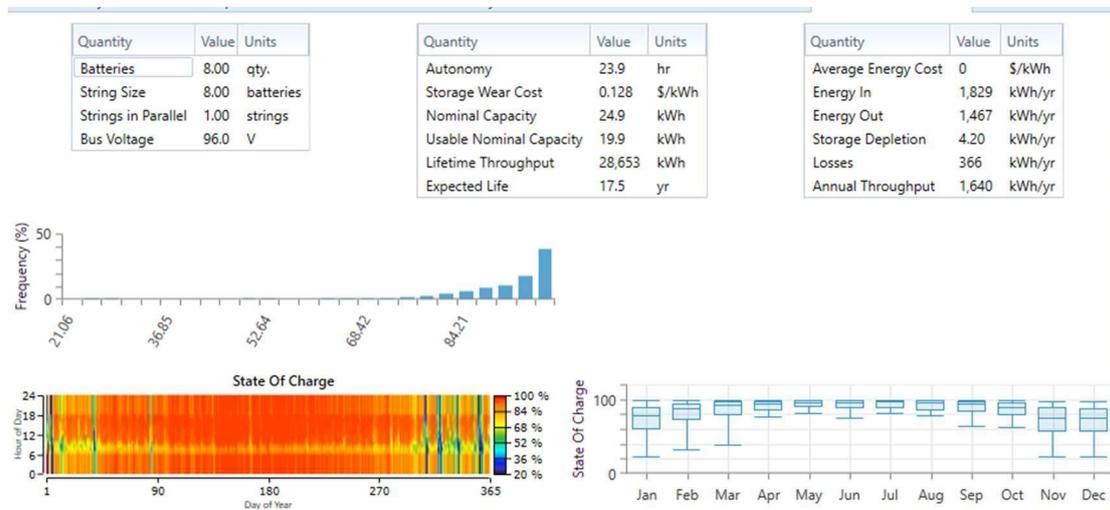
Ces résultats et graphiques issus de la simulation sur HOMER PRO permettent d'évaluer les performances du convertisseur, de comprendre son efficacité énergétique et de prendre des décisions éclairées pour optimiser son fonctionnement.

### III.6.4 Résultat sur les batteries

Ces résultats permettent d'évaluer la capacité et les performances du système de stockage d'énergie basé sur les batteries. Ils fournissent des informations sur le nombre de batteries utilisées, la configuration en série et en parallèle, la tension du bus et l'autonomie des batteries.

HOMER Pro propose d'installer une série de 8 batteries connectées en série pour atteindre une tension de champ photovoltaïque de 96V et une configuration en parallèle. Le profil de la distribution journalière moyenne de l'état de charge des batteries est constant tout au long de l'année. Les batteries se chargent chaque jour à 100%. En l'absence d'énergie photovoltaïque, ils jouent un rôle d'appoint pour assurer une alimentation continue, donc elles doivent être constamment chargées.

L'autonomie des batteries est de 23.9 heures, ce qui signifie qu'elles peuvent fournir de l'énergie pendant 23.9 heures en cas d'absence totale de source d'énergie externe, comme le réseau électrique ou le système photovoltaïque. Cette information sur l'autonomie des batteries est importante pour évaluer leur capacité à maintenir l'alimentation en cas d'absence de sources d'énergie principales. Elle permet également de dimensionner correctement le système de stockage d'énergie pour répondre aux besoins spécifiques



**Figure III. 19: état de charge moyenne journalière et mensuelle des batteries**

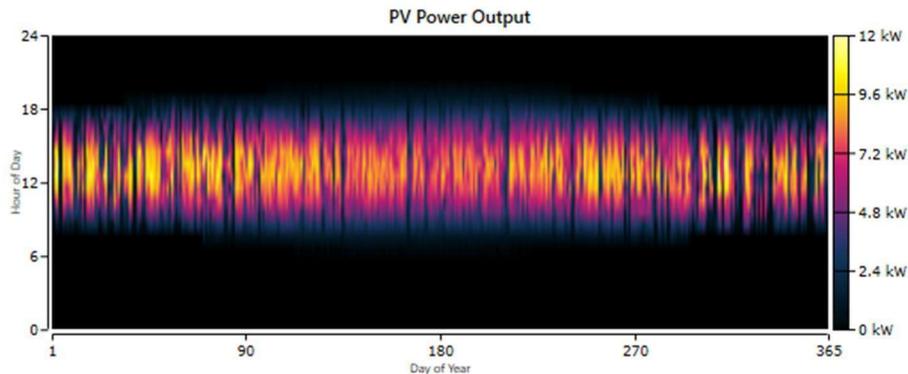
### III.6.5. Résultats du champ PV

La Figure III.20 présente une représentation graphique de la production d'énergie photovoltaïque. En combinant ces informations, on peut comprendre que le système étudié a une capacité nominale de 11 kW, mais il fonctionne à un facteur de capacité relativement bas de 20.2%. Cela signifie que le système n'utilise pas toute sa capacité potentielle de manière constante. La sortie maximale du système est légèrement supérieure à la capacité nominale, atteignant 11.4 kW dans certaines conditions. Le coût nivelé de production de l'électricité est relativement bas ( $= 0.0272$  dollar/kWh), ce qui suggère une efficacité économique favorable du système.

## Chapitre III Simulation du système par Homer

Quantity	Value	Units
Rated Capacity	11.0	kW
Mean Output	2.23	kW
Mean Output	53.5	kWh/d
Capacity Factor	20.2	%
Total Production	19,529	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	11.4	kW
PV Penetration	268	%
Hours of Operation	4,385	hrs/yr
Levelized Cost	0.0272	\$/kWh



**Figure III. 20: Puissance journalière moyenne délivré par les générateur PV**

### III.6.6 Résultats sur GE

En combinant les informations fournies dans le tableau, on peut tirer certaines conclusions sur les performances du générateur diesel étudié dans le cadre de la simulation réalisée avec le logiciel Homer :

- ✓ Le générateur diesel étudié a un facteur de capacité extrêmement faible (égale à 0.0542 %), ce qui suggère qu'il est rarement utilisé ou qu'il fonctionne à des niveaux de charge très bas. La sortie électrique maximale de 20 kW indique la capacité maximale du générateur à fournir de l'électricité. Cependant, étant donné le faible facteur de capacité, il est probable que le générateur fonctionne à des niveaux de charge bien inférieurs à sa capacité maximale.
- ✓ La consommation de carburant du générateur diesel s'élève à 124 litres.
- ✓ La production électrique annuelle du générateur diesel est de 380 kWh.

## Chapitre III Simulation du système par Homer

Quantity	Value	Units
Hours of Operation	19.0	hrs/yr
Number of Starts	19.0	starts/yr
Operational Life	3,158	yr
Capacity Factor	0.0542	%
Fixed Generation Cost	1.45	\$/hr
Marginal Generation Cost	0.253	\$/kWh

Quantity	Value	Units
Electrical Production	380	kWh/yr
Mean Electrical Output	20.0	kW
Minimum Electrical Output	20.0	kW
Maximum Electrical Output	20.0	kW

Quantity	Value	Units
Fuel Consumption	124	L
Specific Fuel Consumption	0.325	L/kWh
Fuel Energy Input	1,215	kWh/yr
Mean Electrical Efficiency	31.3	%

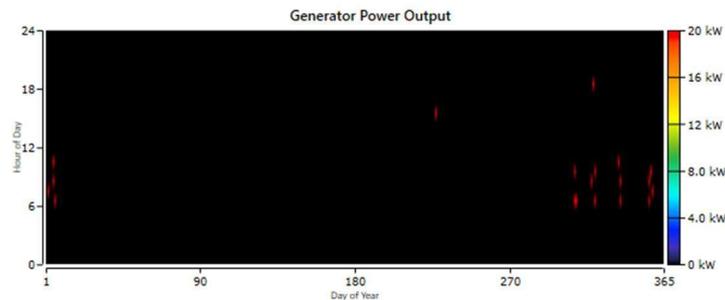


Figure III. 21: Indication puissance de réseau

### III.6.7 Résultats sur les émissions

La simulation réalisée dans le logiciel HOMER Pro a produit les résultats suivants en termes d'émissions de polluants :

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	4,973	kg/yr
Carbon Monoxide	31.3	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	1.37	kg/yr
Particulate Matter	0.190	kg/yr
Sulfur Dioxide	12.2	kg/yr
Nitrogen Oxides	29.4	kg/yr

Figure III. 22: La quantité des gaz émis par le système

Ces résultats soulignent la nécessité d'adopter des mesures visant à réduire les émissions polluantes. Cela peut inclure l'adoption de technologies plus propres, l'amélioration de l'efficacité énergétique et la promotion de sources d'énergie renouvelable. Une approche plus respectueuse de l'environnement et axée sur la durabilité est essentielle pour atténuer les effets néfastes des polluants et préserver la qualité de l'air que nous respirons.

### III.7. Les perspectives

Notre étude propose plusieurs perspectives pour le développement futur,

1. Intégration de technologies de stockage améliorées : Les systèmes de stockage d'énergie, tels que les batteries, sont un élément clé des systèmes hybrides diesel. Les perspectives pourraient inclure

### Chapitre III Simulation du système par Homer

l'exploration de technologies de stockage plus avancées, telles que les batteries lithium-ion, les supercondensateurs ou les systèmes de stockage d'hydrogène, qui pourraient améliorer l'efficacité et la fiabilité du système.

2. Utilisation de l'intelligence artificielle pour l'optimisation : Les perspectives pourraient également inclure l'intégration de techniques d'intelligence artificielle pour l'optimisation des systèmes hybrides diesel avec stockage. Par exemple, l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique pour prédire la demande d'énergie, optimiser la gestion de l'énergie et minimiser l'utilisation du diesel en exploitant au maximum l'énergie solaire disponible.
3. Évaluation économique à plus long terme : Dans le cadre des perspectives, il serait intéressant d'étudier l'aspect économique à plus long terme des solutions photovoltaïques pour les infrastructures portuaires. Cela pourrait inclure une analyse coût-bénéfice approfondie, en tenant compte des coûts d'installation, des coûts de maintenance, des économies de carburant à long terme et des éventuelles subventions ou incitations gouvernementales.
4. Extension du système à d'autres zones portuaires : Une perspective pourrait être d'étendre l'étude à d'autres zones portuaires similaires à SIDI OUCHA. Cela permettrait de déterminer si le système hybride diesel avec stockage est une solution viable et rentable pour d'autres infrastructures portuaires confrontées à des problèmes similaires de fiabilité énergétique et d'émissions de gaz à effet de serre.
5. Étude des effets environnementaux : Une autre perspective intéressante pourrait être d'étudier plus en détail les effets environnementaux de l'adoption de solutions photovoltaïques pour les infrastructures portuaires. Cela pourrait inclure une analyse de l'empreinte carbone réduite, de l'impact sur la qualité de l'air local et des bénéfices environnementaux globaux liés à la réduction de la consommation de diesel.
6. Sensibilisation et éducation : Enfin, une perspective importante pourrait être de promouvoir la sensibilisation et l'éducation sur les avantages des solutions photovoltaïques pour les infrastructures portuaires. Cela pourrait inclure la diffusion des résultats de votre étude à des acteurs clés, des décideurs politiques et des parties prenantes pour encourager l'adoption de ces solutions durables.

D'après notre étude, et nos résultats, nous avons proposer plusieurs perspectives pour le développement futur. Parmi celles-ci, il est suggéré d'explorer des technologies de stockage améliorées, d'intégrer l'intelligence artificielle pour optimiser les systèmes hybrides, d'évaluer l'aspect économique à long terme, d'étendre l'étude à d'autres zones portuaires similaires, d'étudier les effets environnementaux et de promouvoir la sensibilisation et l'éducation sur les avantages des solutions photovoltaïques. Ces perspectives offrent des pistes de recherche intéressantes pour améliorer l'efficacité, la rentabilité et la durabilité des infrastructures portuaires.

### **Conclusion**

L'optimisation des ressources est un élément essentiel pour évaluer l'efficacité des systèmes d'énergie renouvelable. Dans ce chapitre, nous avons utilisé des modèles informatiques issus

## Chapitre III Simulation du système par Homer

du logiciel HOMER pour trouver une solution efficace d'énergie hybride basée sur l'énergie solaire.

À partir des résultats de l'optimisation, le système énergétique optimisé que nous avons identifié comprend des modules PV d'une capacité de 11 kW, un convertisseur de 80 kW, un convertisseur de 2.96 kW et un banc de 8 batteries.

Les simulations ont révélé que la production annuelle totale d'électricité du système est de 19529 kWh/an. La majorité de cette énergie est générée par les modules photovoltaïques, représentant 98.1% de la production totale, tandis que le réseau fournit 1.91 %.

# *Conclusion générale*

# Conclusion générale

## Conclusion générale

Ce mémoire traite de l'étude des solutions photovoltaïques pour les infrastructures portuaires de SIDI OUCHAA, en se concentrant sur l'intégration de panneaux solaires, de groupes électrogènes et de batteries de stockage. Dans le cadre de ce projet, les points suivants ont été abordés :

- ❖ cette étude a démontré que l'implémentation d'un système hybride photovoltaïque-diesel dans les infrastructures portuaires de Sidi Ouchaa est une solution prometteuse pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles et promouvoir une production d'énergie plus propre et durable. Les résultats obtenus ont montré que l'intégration de panneaux solaires photovoltaïques dans le mix énergétique existant permet de générer une part significative de l'électricité nécessaire aux opérations portuaires.
- ❖ En plus de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et les coûts liés à l'approvisionnement en carburant, le système hybride offre également une plus grande autonomie énergétique en utilisant l'énergie solaire disponible pendant les périodes d'ensoleillement. L'étude a souligné l'importance de concevoir une infrastructure adaptée, intégrant efficacement les panneaux solaires, les batteries de stockage et les générateurs diesel pour assurer une gestion optimale de l'énergie.
- ❖ Les résultats confirment l'importance de l'utilisation de modèles informatiques et d'outils d'optimisation pour concevoir des systèmes énergétiques hybrides efficaces, exploitant pleinement le potentiel de l'énergie solaire et favorisant une gestion optimale des ressources dans les infrastructures portuaires de Sidi Ouchaa.
  - ❖ les simulations ont démontré que la production annuelle d'électricité du système s'élève à 19 529 kWh/an. La majeure partie de cette production est générée par les modules photovoltaïques, qui représentent 98,1 % de la production totale, tandis que le réseau fournit seulement 1,91 %. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité et le rôle prépondérant des modules photovoltaïques dans la production d'énergie du système.

En conclusion, l'étude démontre que l'utilisation de solutions photovoltaïques dans les infrastructures portuaires de Sidi Ouchaa, en combinant les avantages des technologies solaires et des générateurs diesel, peut contribuer à la transition énergétique, à la réduction des émissions de carbone et à la promotion d'un développement portuaire durable. Des mesures d'accompagnement appropriées, telles que des incitations fiscales et une réglementation

## Conclusion générale

favorable, sont nécessaires pour encourager l'adoption à grande échelle de ces solutions et garantir leur succès à long terme.

# Bibliographie

## Bibliographie

- [1] F. BAGHADADI, "Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables", Mémoire de Magister, Université de Mouloud Mammerie de TIZI-OUZOU, Faculté du Génie de Construction-Département du Génie Mécanique, Algérie, 2011.
- [2]: J .Labbé, "L'hydrogene electrolytique comme Moyen de Stockage d'electricite Pour Systemes Photovoltaïques Isoles", Thèse de Doctorat, l'Ecole des Mines de Paris, pp. 5-17-18-21-50-68-69 , 21 décembre 2006.
- [3]: M. Huart, "Guide des énergies renouvelables", Association pour la Promotion des Energies Renouvelables, Ministère de la Région Wallonne éditeur, 1994.
- [4]: J. Muller, R. Desserrières, "Conversion photovoltaïque", Publié par: Club CRIN, 2002.
- [5]: C. Alonso, J. Alzeu, C. Andrieu, S. Astier, J. Bonal, A. H. Ben, C. Combes, F. Costa, B. Dakyo, R. Desserrières, J. Fonio, O. Gergaud, C. Glazie, J-C. Muller, B. Multon, C.Nichita, X. Roboam, P. Rossetti, "L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables", ECRIN, ISBN : 2-912154-08-1, Paris, 2002.
- [6]: Hadjadj Dounia, Belkhiri Omnia, « Etude des Caractéristiques d'un Capteur Solaire Photovoltaïque et Evaluation de ses Performances Sous Différentes Conditions Climatiques.», MEMOIRE pour l'obtention du diplôme de MASTER Académique, Université 8Mai 1945 – Guelma, 2022.
- [7]: MEKLICHE Said , « Etude et Simulation des paramètres électriques d'une cellule solaire photovoltaïque à base de Silicium», Pour l'obtention du diplôme de Master, UNIVERSITE MOULOUDE MAMMERI DE TIZI-OUZOU,2017.
- [8]: Thomas Mambrini, « Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies », THÈSE DE DOCTORAT, UNIVERSITE PARIS-SUD, 2014.
- [9]: E. SANYA, "Connaissance et maintenance des groupes électrogènes", Document de cours, Institut Universitaire et des Technologies de Lokossa, Bénin, 2006.
- [10]: BELGHMI Youssef, H. A. (s.d). ETUDE DU GROUPE ELECTROGENE AUX SEIN DE CHU Hassan II.'

# Bibliographie

- [11]: Chafa Aliane, Aziz Zeroul, « Etude d'un groupe électrogène par simulation numérique », Mémoire de Fin d'Etudes, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2016.
- [12] B. COLIN, "groupes électrogènes de secours", techniques de l'ingénieur, D 5180, 18 pages, 2007.
- [13] : Nacer AIT CHEKDHIDH, « Etude de système générateur photovoltaïque-batterie : Application au Véhicule électrique », Mémoire de Fin d'Etudes INGENIEUR D'ETAT, 2014.
- [14] Chellal, A. A., Lima, J., Gonçalves, J. & Megnafi, H. (2021b). Battery Management System For Mobile Robots based on an Extended Kalman Filter Approach. 2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED).
- [15]: Isdeen YAYA NADJO, “Étude d'un système hybride solaire photovoltaïque/diesel pour une production décentralisée d'électricité au Bénin”,Mémoire pour l'obtention du DIPLÔME D'INGENIEUR DE CONCEPTION,2012.
- [16]: MEHIBEL.Houssam, « Etude d'un système hybride photovoltaïque – Diesel », Mémoire de Projet de Fin d'Etudes, Electrotechnique : Alger, Ecole Nationale Polytechnique ,2017.
- [17]: SANKARA Moussa, “Conception de système de pilotage de centrale hybride PV/Diesel sans stockage d'énergie,” 2iE, Burkina Faso (Ouagadougou), Mémoire pour l'obtention du master en ingénierie de l'eau et de l'environnement, Juin 2011.
- [18]: Ludmil Stoyanov, “Etude de différentes structures de systèmes hybrides a sources d'énergie renouvelables,” UNIVERSITE DE CORSE PASQUALE PAOLI et UNIVERSITE TECHNIQUE DE SOFIA, 2011.
- [19]: BENDAOUD, Bencherki, « Etude des performances d'une électrification rurale basée sur des systèmes mini réseaux hybrides de production d'électricité », mémoire fin d'étude Université Hassiba Benbouali de Chlef, 2011.
- [20]: S. PETIBON, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2009.
- [21]: FERDJI Amina. KADRI Nour El Houda, « ETUDE D'UNE INSTALLATION HYBRIDE (PHOTOVOLTAÏQUE-RESEAU) : APPLICATION L'AIRE DE REPOS LES ZIANIDES », Mémoire de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur Essat ,2022
- [22]: M. IBRAHIM et al, "Approvisionnement en énergie solaire des sites isolés et systèmes de secours", Recueil technologique 2, SMA Solar Technology AG, 44 pages, 2010.

# Bibliographie

[23]: F. BRIHMAT, "Etude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/ Eolien", Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université de Mouloud Mammerie de TIZI-OUZOU, Faculté du Génie électrique et informatique, Algérie, 2012.

[24]: Tounsia BEN KHEMMOU, « Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque intégrée au bâtiment : Cas d'un laboratoire au CDER », Mémoire de Fin d'Etudes, UNIVERSITE MOULOUDE MAMMERI DE TIZI-OUZOU,2014.

[25]: BELABED Rafik, « Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque», Mémoire d'obtention du diplôme de master académique en génie mécanique option énergétique, Tizi-Ouzou, 2016-2017.

[26]: D. YAMEGUEU, Y. AZOUMAH, X. PY, "Étude expérimentale et économique d'un système hybride solaire photovoltaïque/diesel sans stockage pour une production décentralisée d'électricité", Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 9 pages, 2011.

[27] : Abdel Kadet Ould Mahmoud, 'Caractérisation, modélisation, fonctionnement et impact d'un système hybride pour l'alimentation de charges mixtes'. Université Cheikh Anta Diop - Thèse d'Etat 2008 – Dakar.

[28]: A.YAKER, B. BELAID, « Dimensionnement d'une centrale photovoltaïque». Tizi-Ouzou, 2015.

[29]: Djaffer CHERFI, Anis MOUZAOU, « Dimensionnement d'un kit photovoltaïque autonome », Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE,2015.

[30]: <https://www.domomat.com/blog/cablage-installation-photovoltaïque/>

[31]: Bendaoud Bencherki, 'Étude des performances d'une électrification rurale basée sur des systèmes mini réseaux hybrides de production d'électricité', Mémoire Magistère en Génie Mécanique. Université Hassiba Benbouali Chlef 11 juillet 2011

[32]: SIKIROU, Djawad, « Electrification d'un marché moderne avec un système hybride de production d'énergie électrique », Mémoire d'obtention de diplôme d'ingénieur de conception, Génie électrique, Contrôle de processus industriels, Bénin, 2018

[33]: BENCHERIF Mohemmed, « Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension », Doctorat en physique, Physique énergétique et matériaux, Université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen, 2014.

[34]: PHUOC Tri Le, « Simulate and experimentally evaluate a specific PV-based microgrid system for replication in Vietnam », Applied project for the requirements of the professional master's degree, Solar energy engineering and commercialization, Arizona state university

# Bibliographie

[35]: BENBOUABDELLAH Zakaria, HADJAL El Mehdi, « Modélisation et simulation d'un système de stockage dans une alimentation hybride », Mémoire fin d'étude d'obtention de diplôme d'ingénieur, électrotechnique, Energie et environnement, 2021

[36]: GHENAIM Sabah, SEBKHI Yasmine, « Simulation d'une Centrale PV connectée au réseau électrique par deux logiciels «PVSYST» et 'HOMER Pro' », Mémoire master, Réseau Electrique, Biskra, 2020.