

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 d'Ingénieur

Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Énergie et Environnement

Présenté par : **Fadli Abderrachid.**  
**Djezzar Abdelkrim.**

### Thème

**Etude comparative d'une installation  
photovoltaïque isolée et connectée au  
réseau : Application aux sites.**

devant le jury composé de :

Mme N.Benahmed	Professeur	ESSA. Tlemcen	Présidente
Mme M. Bouchaour	MCA	UNIV. Tlemcen	Directrice de mémoire
M L. Merad	Professeur	UNIV. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
M A.Chemidi	MCA	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
M F. Oudjama	MAB	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire :2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à Dieu Tout-Puissant qui nous a donné la volonté et la patience de mener à bien ce travail.

Sincères remerciements à nos encadreurs, **Mme Mama Bouchaour** et **Monsieur Laarej Merad**, pour leur écoute, leur soutien continu, leur aide précieuse, et les sages conseils prodigués tout au long de la préparation de ce mémoire.

Nous souhaitons également exprimer notre reconnaissance et nos remerciements les plus sincères aux membres du jury, à savoir madame **Benahmed Nadia** (Pr), monsieur **Chemidi Abdelkarim** (MCA) et monsieur **Oudjama Farid** (MAB), pour avoir généreusement accepté de consacrer leur temps et leur expertise à l'évaluation de ce travail.

Nous exprimons également notre gratitude envers nos professeurs, monsieur **Mohammed Mebrouki** et monsieur **Abdelkader Ghezouani**, pour leur aide précieuse.

Un grand merci à toutes les personnes ayant contribué à la préparation de cette thèse, ainsi qu'à tous nos professeurs et enseignants pour leurs efforts considérables pour nous guider et offrir un enseignement de qualité.

Enfin, merci à tous ceux qui ont offert leur aide et soutien dans la préparation de ce livre, ainsi qu'à ceux qui nous ont soutenus de quelque manière que ce soit, Nous vous remercions tous.

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à :*

- *Ma mère Bouaziz Mebrouka, son engagement constant et sa bienveillance tendre ont toujours été une véritable source d'inspiration pour moi. Je lui exprime ma profonde gratitude pour tout ce qu'elle a fait et continue de faire pour moi. Je te remercie, maman, d'incarner parfaitement la mère idéale.*
- *Mon père Mohamed, tu as toujours été plein de patience, de soutien constant et de bienveillance sincère, ce qui a joué un rôle essentiel dans la formation de mon identité actuelle. Avec toi, j'ai développé la valeur du dévouement, de l'intégrité et de la compassion envers les autres. Je suis profondément marqué par ces valeurs que tu as incarnées, et je m'engage quotidiennement à les transmettre dans mes actions.*
- *Mes frères Abderrahim et Elhadj, Vous avez été une précieuse bénédiction dans ma vie. Pendant les instants de joie comme pendant les difficultés, vous avez toujours été*

*présent, partageant les éclats de rire, apaisant les larmes, et faisant de chaque instant un souvenir important.*

*Chaque individu ajoute une dimension unique à ma vie, enrichissant ma vie grâce à son amour, son soutien et sa compréhension.*

- *Mes sœurs Fatima Zohra , Hafsa et Yamina, Aujourd'hui, je souhaite simplement exprimer ma gratitude. Je vous remercie d'être les magnifiques sœurs que vous êtes. Je vous remercie pour votre affection sans conditions, votre soutien inébranlable et votre présence apaisante. Je vous suis extrêmement reconnaissant(e) d'être présent(e) dans ma vie, et je garderai toujours notre communauté.*
- *Mon copain Djezzar Abdelkarim, je te suis infiniment reconnaissant d'avoir cru en moi et d'avoir été une part importante de cette étape de ma vie .*
- *Hanane Yacheur, Votre bienveillance et votre désir de me soutenir sont des qualités remarquables qui ne sont pas négligées. Je suis vraiment inspiré par votre aptitude à fournir des conseils pertinents et à ouvrir de nouvelles perspectives.*

# *Dédicaces*

Je dédie ce travail :

À ma mère Barkaoui Mokhtaria , qui m'a enseigné à aimer et à partager, et qui m'a toujours soutenue dans mes rêves. Je t'aime plus que tout, mère chère.

À mon père Mohamed, rabi yarhmou, qui nous a quittés, ton amour, ta sagesse et ta bienveillance continuent de nous guider. Ton souvenir restera gravé dans nos cœurs à jamais.

À mon oncle Amar ,j'aimerais exprimer ma gratitude la plus sincère , qui a joué le rôle de mon père. Les conseils, la sagesse et l'amour qu'il m'a offerts ont été une véritable source d'inspiration et de soutien. Je tiens à exprimer ma gratitude pour l'amour et la dévotion qu'il a toujours manifestés envers moi. T'aime et je te suis reconnaissant pour tout.

À mes frères et sœurs : Samir,Sidahmad,Zineb et Fatiha, qui ont partagé mes bonheurs et mes souffrances, et qui continuent de me soutenir dans mes aspirations. Je vous aime énormément.

À Rassim , Douaa , Yacine et Rodaina, les enfants de mon cœur, je vous dédie ce travail avec amour et ma gratitude pour les moments de tendresse et de joie .

À ma tante maternelle Naima , qui a toujours été présente dans mon cœur, je dédie ce travail en reconnaissance de son amour et de son soutien constant. Je suis reconnaissant de l'attention et de la tendresse qu'elle m'a toujours montrées, et je l'aimerai toujours pour cela.

À mon binôme et mon ami Abdel Rachid Fadli, avec qui j'ai partagé des moments inoubliables et des souvenirs précieux, qui m'a toujours été présent et m'a soutenu dans mes rêves, je dédie ce travail avec amour et ma gratitude pour les moments de joie et de rire que nous avons partagés ensemble.

À vous tous, mes proches et mes amis, je vous adresse mes plus sincères remerciements.

Avec une profonde gratitude,

## Résumé

L'étude compare l'installation de systèmes photovoltaïques (PV) dans des zones isolées et connectées à Tlemcen, Adrar et Mecheria à l'aide de HOMER Pro. Elle inclut la collecte de données spécifiques, la configuration de solutions variées, et l'évaluation des performances et des coûts. L'objectif est d'identifier les configurations les plus rentables et adaptées à chaque site pour formuler des recommandations efficaces et durables en matière d'énergie, tenant compte des conditions géographiques et de la disponibilité du réseau électrique.

**Mots-clés :** PV, installation, zones isolées, connectées au réseau, Tlemcen, Adrar, Mecheria, HOMER Pro, performances, coûts, rentabilité, durabilité, recommandations.

## الملخص

الدراسة تقارن تثبيت أنظمة الطاقة الشمسية (PV) في المواقع المعزولة والمتصلة بالشبكة في تلمسان، أدرار، ومشربية باستخدام برنامج HOMER Pro. تشمل جمع البيانات الخاصة، وتكوين حلول متنوعة، وتقييم الأداء والتكاليف. الهدف هو تحديد التكوينات الأكثر ربحية وملائمة لكل موقع لصياغة توصيات فعالة ومستدامة لتلبية احتياجات الطاقة، مع مراعاة الظروف الجغرافية وتوفر الشبكة الكهربائية.

كلمات مفتاحية: تثبيت، المواقع المعزولة، المتصلة بالشبكة، تلمسان، أدرار، مشربية، HOMER Pro، أداء، تكاليف، ربحية، استدامة، توصيات.

## Abstract

The study compares the installation of photovoltaic (PV) systems in isolated and grid-connected locations in Tlemcen, Adrar, and Mecheria using HOMER Pro. It involves specific data collection, configuration of various PV solutions, and evaluation of performance and costs. The aim is to identify the most cost-effective and suitable configurations for each site to formulate effective and sustainable energy recommendations, considering geographical conditions and electrical grid availability.

**Keywords:** PV, installation, isolated sites, grid-connected sites, Tlemcen, Adrar, Mecheria, HOMER Pro, performance, costs, cost-effectiveness, sustainability, recommendations.

# Table de matière

Dédicaces	I
Resumé	I
Liste de Figures	V
Liste de Tableaux	VII
Abréviations	VIII
Symboles	IX
Introduction Générale	1
<b>Chapitre I:Généralités sur les systèmes Panneaux photovoltaïques (PV)</b>	<b>4</b>
I.1 Historique . . . . .	4
I.2 L'énergie solaire . . . . .	5
I.2.1 Rayonnement solaire . . . . .	5
I.2.1.1 Définition . . . . .	5
I.2.1.2 Différents types de rayonnements solaires . . . . .	5
I.2.2 Gisement solaire en Algérie . . . . .	7
I.2.3 Potentiel Solaire . . . . .	8
I.2.3.1 Définition . . . . .	8
I.2.3.2 Facteurs qui dépende le potentiel solaire . . . . .	8
I.2.3.3 Outils pour estimer le potentiel solaire . . . . .	9
I.2.4 Spectre Solaire . . . . .	10
I.3 Cellules solaires . . . . .	10
I.3.1 Définition . . . . .	10
I.3.2 Matériaux semi-conducteurs . . . . .	11
I.3.3 Différents types de cellules solaire . . . . .	11
I.3.3.1 A base silicium . . . . .	11
I.3.3.2 Autres matériaux . . . . .	12
I.4 Protection classique d'un Générateur photovoltaïque (GPV) . . . . .	12
I.4.1 Définition d'un GPV . . . . .	12
I.4.2 L'importance de la protection d'un GPV . . . . .	13

I.4.3	Système de protection d'un GPV . . . . .	13
I.4.3.1	Diode de dérivation . . . . .	13
I.4.3.2	Diode anti-retour . . . . .	14
I.5	Systèmes PV avec stockage et sans stockage . . . . .	14
I.5.1	Systèmes PV sans stockage . . . . .	14
I.5.2	Systèmes PV avec stockage . . . . .	15
I.6	Installations photovoltaïques raccordées au réseau . . . . .	16
I.6.1	Types des installation PV raccordées au réseau électrique . . . . .	16
I.6.2	Systèmes PV connectés au réseau sans stockage . . . . .	19
I.6.3	Systèmes PV connectés au réseau avec stockage . . . . .	19
I.7	Avantages et Inconvénients de l'installation PV . . . . .	20
I.7.1	Avantages: . . . . .	20
I.7.2	Inconvénients . . . . .	21
 <b>Chapitre II: Modélisation d'un système PV</b>		<b>24</b>
II.1	Modélisation d'un Générateur photovoltaïque . . . . .	24
II.2	Modélisation de Convertisseurs DC-DC (hacheurs) . . . . .	27
II.2.1	Modélisation du hacheur survolteur(boost) . . . . .	28
II.2.2	Modélisation du hacheur dévolteur (Buck) . . . . .	30
II.2.3	Modélisation du hacheur Buck-Boost) . . . . .	31
II.3	Modélisation de Convertisseurs DC-AC (Onduleur) . . . . .	32
II.3.1	Classification des onduleurs Selon la réversibilité . . . . .	33
II.3.1.1	Onduleur autonome (non raccordé au réseau électrique) . . . . .	33
II.3.1.2	Onduleurs non autonome (raccordés aux réseaux) . . . . .	33
II.3.2	Modélisation d'un onduleur monophasé . . . . .	34
II.3.2.1	Le modèle mathématique . . . . .	35
 <b>Chapitre III: Installation PV dans site isolé/connecté au réseau</b>		<b>39</b>
III.1	Etude analytique de l'installation PV . . . . .	39
III.2	Présentation du Logiciel HOMER Pro . . . . .	40
III.2.1	Définition . . . . .	40
III.2.2	Méthode générale d'utilisation HOMER Pro . . . . .	40
III.2.3	Méthodologies spécifiques aux simulations . . . . .	42
III.3	Installation PV dans un site isolé et connecté au réseau . . . . .	43

III.3.1	Coordonnées géographiques des trois régions. . . . .	43
III.3.1.1	Site de Tlemcen . . . . .	43
III.3.1.2	Site de Mecheria . . . . .	44
III.3.1.3	Site d'Adrar . . . . .	44
III.3.2	Ressources nécessaires dans les trois régions . . . . .	45
III.3.2.1	Température . . . . .	45
III.3.2.2	Irradiation solaire . . . . .	46
III.3.3	Schéma de conception d'un système PV . . . . .	47
III.4	Dimensionnement d'installation PV pour les deux cas (Système isolé/connecté au réseau) . . . . .	48
III.4.1	Estimation de la consommation (charge utilisé) . . . . .	48
III.4.2	Choix des panneaux solaires . . . . .	49
III.4.2.1	Détermination de La puissance crête d'un système PV . . . . .	49
III.4.2.2	Calcul du nombre de panneaux . . . . .	50
III.4.2.3	Calcul de la surface occupée par les panneaux . . . . .	51
III.4.3	Choix du Générateur Diesel . . . . .	52
III.4.4	Choix de l'Onduleur . . . . .	53
III.4.5	Choix des batteries . . . . .	54
III.4.5.1	Calcul du nombre de batteries . . . . .	55
III.4.6	Sélection des câbles pour une installation photovoltaïque . . . . .	55
III.4.6.1	Calcul du courant maximal du système PV . . . . .	56
III.4.6.2	Calcul de la résistance du câble: . . . . .	56
III.4.6.3	Calcul de la section du câble: . . . . .	56
III.4.6.4	Calcul du courant maximal de la batterie: . . . . .	56
III.4.6.5	Déterrmination la section de cable entre le boîtier de raccorde- ment et l'onduleur: . . . . .	57
III.4.6.6	Déterrminer la section de cable entre le parc batterie et l'onduleur	57
III.4.6.7	Déterrmination de la section de cable entre l'onduleur et le disjoncteur de maison (L=4m) . . . . .	58

**Chapitre IV: Résultats et Discussion** **60**

IV.1	Résultats de la simulation pour installation de système PV dans site isolé . . .	60
IV.1.1	Pour site Tlemcen . . . . .	60
IV.1.2	Pour site Mecheria . . . . .	61

IV.1.3 Pour site Adrar . . . . .	63
IV.2 Résultats de la simulation pour Installation PV connecté au réseau . . . . .	66
IV.3 Etude économique . . . . .	68
<b>Conclusion Generale</b>	<b>71</b>
<b>Références</b>	<b>72</b>

# Liste des figures

I.1	le pyréliometre [1]	6
I.2	Différentes types de rayonnement solaire[2]	7
I.3	Répartition de l'irradiation solaire en Algérie [3]	8
I.4	Solar Mapper[4]	9
I.5	Types de cellules solaires à base de silicium [5]	12
I.6	Principe de fontionnemnt d'un GPV [6]	13
I.7	Système de protection d'un système PV [7]	14
I.8	Schéma de principe de la configuration avec injection des excédents de production	17
I.9	Schéma de principe de la configuration d'injection totale d'énergie	18
I.10	Schéma de principe de la configuration sans injection de l'énergie	18
I.11	Systèmes PV connectés au réseau avec batterie	19
II.1	Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque[8]	25
II.2	Symbole d'un convertisseur DC-DC	28
II.3	Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage	28
II.4	Schéma de principe d'un convertisseur Boost [9]	29
II.5	Circuit électrique de base du hacheur dévolteur(buck) [10]	30
II.6	Circuit électrique du hacheur buck–boost [11]	32
II.7	Schéma symbolique d'un onduleur	32
II.8	Système photovoltaïque non raccordé au réseau[12]	33
II.9	Système photovoltaïque connecté au réseau [12]	34
II.10	Circuit d'Onduleur monophasé en pont complet [13]	35
III.1	l'interface de logiciel HOMER Pro.	41
III.2	les équipements	41
III.3	Fenêtre pour faire schéma de système	42
III.4	Ressources nécessaires	42
III.5	Localisation de site de Tlemcen sur la carte de l'Algérie [14]	43
III.6	Coordonnées géographiques du site de Tlemcen	43
III.7	Localisation de site de Mecheria sur la carte d'Algérie[15]	44
III.8	Coordonnées géographiques du site Mecheria	44
III.9	Localisation de site Adrar sur la carte d'Algérie[16]	45
III.10	Coordonnées géographiques du site Adrar	45
III.11	Température dans site Tlemcen	45

III.12	Température dans site Mecheria . . . . .	45
III.13	Température dans site Adrar . . . . .	45
III.14	Irradiation dans site Tlemcen . . . . .	46
III.15	Irradiation dans site Mecheria . . . . .	46
III.16	Irradiation dans site Adrar . . . . .	46
III.17	Schéma de l'installation PV avec stockage (site connecté au réseau) . . . . .	48
III.18	Schéma de l'installation PV avec stockage (site isolé) . . . . .	48
III.19	Onduleur hybride . . . . .	54
III.20	Caractéristiques de l'onduleur[17] . . . . .	54
IV.1	Variation annuelle de la production d'énergie photovoltaïque à Tlemcen pour un système isolé . . . . .	60
IV.2	Production mensuelle dans site de Tlemcen (Site isolé) . . . . .	61
IV.3	Production d'énergie PV à Mecheria sur une année . . . . .	62
IV.4	Production mensuelle dans site de Mecheria (Site isolé) . . . . .	63
IV.5	Production d'énergie PV à Adrar sur une année . . . . .	63
IV.6	Production mensuelle dans site de Adrar (Site isolé) . . . . .	64
IV.7	Évolution de la puissance dans site Tlemcen . . . . .	64
IV.8	Évolution de la puissance dans site Mecheria . . . . .	64
IV.9	Évolution de la puissance dans site Adrar . . . . .	64
IV.10	Production mensuelle dans site de Tlemcen (connecté au réseau) . . . . .	66
IV.11	Spectrogramme de la production PV à Tlemcen (connecté au réseau) . . . . .	66
IV.12	Production mensuelle dans site de Mecheria (connecté au réseau) . . . . .	66
IV.13	Spectrogramme de la production PV à Mecheria (connecté au réseau) . . . . .	66
IV.14	Production mensuelle dans site de Adrar (connecté au réseau) . . . . .	67
IV.15	Spectrogramme de la production PV à Adrar (connecté au réseau) . . . . .	67
IV.16	Distribution de la puissance en fonction du temps(dans site Tlemcen) . . . . .	67
IV.17	Distribution de la puissance en fonction du temps (dans site Mecheria) . . . . .	67
IV.18	Distribution de la puissance en fonction du temps (dans site Adrar) . . . . .	67
IV.19	Données financières Données financières (NPC) dans les 3 régions . . . . .	69

## Liste des tableaux

III.1	Températures moyennes pour Tlemcen, Mecheria et Adrar . . . . .	46
III.2	Irradiation solaire et indice de clarté pour Tlemcen, Mecheria et Adrar . . . . .	47
III.3	Consommation journalière de différents appareils . . . . .	48
III.4	Caractéristiques techniques [18] . . . . .	50
III.5	Nombre de panneaux solaires . . . . .	51
III.6	Caractéristiques du générateur Diesel . . . . .	53
III.7	Puissances pour les différents sites . . . . .	53
III.8	Nombre de batteries nécessaires pour chaque site . . . . .	55
III.9	Section de câble entre le boîtier de raccordement et l'onduleur . . . . .	57
III.10	Section de câble entre le parc batterie et l'onduleur pour les trois sites . . . . .	58
IV.1	Coûts de différents systèmes en fonction de la localité . . . . .	68

# Abréviations

<b>BP</b>	bypass
<b>CA</b>	Courant alternatif
<b>CC</b>	Courant continu
<b>CdTe</b>	Les cellules à base de tellure de cadmium
<b>CIGS</b>	Sélénure de cuivre d'indium et de gallium
<b>CIS</b>	Les cellules à base de sélénure de cuivre-indium
<b>GPV</b>	Générateur photovoltaïque
<b>HOMER</b>	Hybrid Optimisation Model For Electric Renewables en anglais
<b>MLI</b>	Modulation de largeur d'impulsion
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation
<b>PV</b>	Panneaux photovoltaïques
<b>SI</b>	Système international
<b>NPC</b>	Données financières
<b>NREL</b>	US National Renewable Energy Laboratory en anglais
<b>SSM</b>	Solution générale sans second membre
<b>STC</b>	Standard Test Conditions

# Symboles

<b>C</b>	La vitesse de la lumière ( $\text{m s}^{-1}$ )
<b>DOD</b>	Depth of Discharge (Profondeur de décharge en français) (%)
<b>Ec</b>	Énergie consommée pendant la disponibilité du rayonnement (J)
<b>Gi</b>	Irradiation solaire du mois le plus défavorable ( $\text{W m}^{-2}$ )
<b>I</b>	Courant nominal (A)
<b>Icc</b>	Courant de court-circuit (A)
<b>Iph</b>	Le photon-courant (A)
<b>Nj</b>	Nombre de jours d'autonomie
<b>Nb</b>	Nombre de batteries
<b>Npanneaux</b>	Nombre total des panneaux solaires
<b>Ns</b>	Nombre séries des panneaux solaires
<b>Np</b>	Nombre parallèle des panneaux
<b>Pc</b>	La puissance crête du panneau photovoltaïque (W)
<b>PN</b>	Puissance nominale des charges (W)
<b>Pi</b>	Irradiation solaire sous conditions STC ( $\text{W m}^{-2}$ )
<b>Pr</b>	Ratio de performance
<b>Rs</b>	Résistance en série ( $\Omega$ )
<b>Rsh</b>	Résistance en parallèle ( $\Omega$ )
$\rho$	Résistivité ( $\Omega \text{ m}$ )
<b>ST</b>	Surface totale du panneau solaire ( $\text{m}^2$ )
<b>Su</b>	Surface unitaire ( $\text{m}^2$ )
<b>T</b>	Température de cellule (K)
<b>VT</b>	Tension thermique (V)
<b>c</b>	Fréquence de photon (Hz)
<b>h</b>	La constante de Planck (Js)
<b>k</b>	Constante de Boltzmann ( $\text{J K}^{-1}$ )
<b>q</b>	La charge d'électron (C)
<b>v</b>	La vitesse de la lumière ( $\text{m s}^{-1}$ )

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateau à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire.

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité propre et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires.

L'utilisation de source d'énergie renouvelable induit le concept de stockage d'électricité en raison de la disponibilité intermittente de telles ressources. L'utilisation du stockage d'électricité est très diversifiée : les applications stationnaires connectée ou non au réseau. En particulier, les sites géographiquement isolés et non raccordés au réseau intégrant une source renouvelable. Le rôle d'un système photovoltaïque de production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter " une puissance énergétique ", mais un outil de développement social et économique des zones rurales. Le nombre de kilowattheures produit peut paraître insignifiant devant la capacité de production énergétique du pays, mais ces quelques dizaines ou centaines de kilowattheures peuvent ranimer tout l'espoir d'un village ou d'une communauté.

Le générateur d'électricité d'origine photovoltaïque avec un système de stockage est assuré par des batteries au plomb pour cela le dimensionnement de stockage optimal basé sur la partie de modélisation des composants constituant ce système et la charge de l'utilisation.

Notre mémoire est structurée en quatre chapitres en plus de l'introduction générale, la conclusion générale et perspective.

Dans le premier chapitre nous présentons un groupe d'éléments de base qui contribuent à la production d'énergie solaire, telles que la potentiel solaire, Masse d'air, Semi-conducteur, Protection classique d'un générateur PV, Les systèmes PV avec stockage et sans stockage, et ainsi que les avantages et Inconvénient de l'énergie PV.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation d'un système PV qui a pour but d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres et de les optimiser en respectant une contrainte donnée. On a aussi expliqué le principe de conversion PV.

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet sera élaborée à partir de modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs, stockage batteries) ; cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi les paramètres constituants.

Le troisième chapitre se penche sur l'étude comparative de deux types d'installations photovoltaïques : les installations autonomes (site isolé) et les installations connectées au réseau électrique.

Le dernier chapitre présente les résultats obtenus dans le cadre de l'étude comparative des deux régions pour les installations photovoltaïques dans les sites isolés et connectés au réseau.

Chapitre I :  
Généralités sur les systèmes PV

## Introduction

Les systèmes photovoltaïques, souvent abrégés en PV, sont des installations qui convertissent la lumière du soleil en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques. Cette technologie, en constante évolution, joue un rôle crucial dans la transition vers des sources d'énergie renouvelable et durables. Les recherches dans ce domaine couvrent un large éventail de sujets, allant de l'amélioration de l'efficacité des cellules solaires à l'intégration intelligente des systèmes PV dans les réseaux électriques.

### I.1 Historique

En 1839, le célèbre physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque avec l'exploitation des cellules PV [19].

Cependant, ce n'est qu'à l'approche des années 60 qu'une réelle application de cette conversion énergétique a lieu, dans le cadre de la course spatiale. En effet, l'armée américaine, désireuse de lancer son projet d'envoi de satellites spatiaux, accomplit ce défi le 17 mars 1958 avec l'envoi de "Vanguard 1", réalisé par la Navy. Le but était d'envoyer un satellite fonctionnant à l'énergie solaire. Malgré cela, l'armée américaine refuse néanmoins de faire appel au photovoltaïque, jugeant son efficacité moindre par rapport à d'autres types de conversion de l'énergie solaire[20].

Au début des années 1970, avec l'avènement du mouvement écologique, l'utilisation terrestre des cellules photovoltaïques apparaît, bien que leur prix reste très élevé (100 euro le watt)[? ]. Cette exploitation reste principalement dans le domaine spatial jusqu'en 1973, avec la production massive de panneaux photovoltaïques par la Solar Power Corporation, à un prix de 20 euro par watt. Cela a permis à des industries telles que celle du pétrole de commencer à exploiter cette technologie. Dans les années 80, l'ingénieur suisse Markus Real avance l'idée qu'il serait plus économique que chaque particulier puisse utiliser ses propres modules photovoltaïques. Cette proposition est mise en œuvre après l'installation de panneaux solaires sur 333 toits à Zurich, en Suisse. Après son succès, plusieurs gouvernements du monde entier entreprirent de lancer des campagnes du même type, démocratisant ainsi l'exploitation de l'énergie photovoltaïque.

Les années 1990 ont été marquées par l'émergence du photovoltaïque connecté au réseau, ce qui était considéré à l'époque comme une anomalie économique. Néanmoins, cette application

a connu une croissance exponentielle dans les pays du Nord, grâce à l'encouragement financier des États pour développer cette industrie très prometteuse. Les résultats ont dépassé toutes les attentes, car dans certaines régions, le kWh d'énergie photovoltaïque injecté sur le réseau présente le coût actualisé le plus bas par rapport à toutes les autres sources d'énergie. Dans le passé, les systèmes autonomes étaient principalement utilisés dans des applications professionnelles nécessitant de l'électricité et qui ne pouvaient pas être remplacés par d'autres sources (réseau, groupe électrogène)[21].

## I.2 L'énergie solaire

### I.2.1 Rayonnement solaire

#### I.2.1.1 Définition

L'énergie du soleil est produite par les réactions de fusion thermonucléaires (la fusion est la réunion de plusieurs noyaux atomiques légers en un seul (4 noyaux d'hydrogène) en un noyau d'hélium) Le rayonnement solaire peut être décomposé en trois éléments dont la proportion est variable suivant le lieu et le moment : rayonnement direct, diffus, l'albédo et global. Elles ont favorisé l'élaboration de modèles de rayonnement solaire. Plus récemment, des recherches se concentrent sur la modélisation du caractère aléatoire du rayonnement solaire en utilisant des réseaux de neurones et l'analyse fractale. Certains travaux ont employé l'insolation tandis que d'autres ont employé la moyenne quotidienne de l'humidité relative, le maximum et le minimum de la température. D'autres travaux sont également réalisés afin d'évaluer le potentiel solaire. Il convient de mentionner les premiers travaux de Liu et Jordan qui ont mis en évidence une corrélation entre l'irradiation solaire diffuse quotidienne et celle globale sur une surface horizontale[22].

#### I.2.1.2 Différents types de rayonnements solaires

**Rayonnement diffus:** Le rayonnement qui atteint le sol après avoir été en contact avec les composants de l'atmosphère[23]. Le rayonnement diffus est constitué de la lumière diffusée par les molécules de l'atmosphère. La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle

en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. C'est lui qui nous donne la "lumière du jour" qui nous permet de voir clair même quand le temps est couvert.

**Rayonnement direct :** Le rayonnement direct parvenant directement de l'angle solide délimité par le disque solaire[24]. C'est lui qui nous aveugle lorsque on cherche à regarder le soleil "droit dans les yeux" par temps découvert, peut être mesuré par le pyréliomètre [25].



Figure I.1 le pyréliomètre [1] .

**Rayonnement dû à L'albédo ou réfléchi :** Il dépend de l'environnement du site, il résulte de la réflexion du rayonnement solaire direct par le sol, qui est d'autant plus important que la surface est claire et réfléchissante (neige, étendue d'eau, ...). Il peut nous faire attraper des coups de soleil à la montagne ou à la mer sans qu'on les sente venir. Il est distingué par un coefficient spécifique de la nature du lieu, connu sous le nom d'Albédo ,cette coefficient entre 0 et 1[26].

**Rayonnement global:** Le rayonnement global est la somme de ces trois types de rayonnement diffus, le rayonnement direct et l'albédo[27], comme présenté dans la figure I.2.



Figure I.2 Différentes types de rayonnement solaire[2].

### I.2.2 Gisement solaire en Algérie

L'Algérie dispose d'un vaste potentiel en matière d'énergies renouvelables, en particulier grâce à ses gisements solaires couvrant une superficie de 2 381 745 kilomètres carrés. Cependant, cet enjeu important et inépuisable reste largement inexploité. En raison de sa grande taille, l'Algérie présente une diversité de climats, ce qui influe sur le rayonnement solaire dans différentes zones du pays. Les régions du nord, situées près de la mer, sont généralement plus nuageuses que les régions du sud. Le Sahara, bien qu'il reçoive plus d'énergie solaire, se caractérise également par des températures plus élevées.

En raison de cette diversité climatique, l'ensoleillement moyen global sur le plan horizontal varie entre 4,5 et 7,5 kWh/m<sup>2</sup> en Algérie. Cette diversité a permis de diviser le pays en huit zones climatiques distinctes avec un ensoleillement relativement uniforme.

Il est important de noter que l'utilisation efficace de ces sources d'énergie renouvelable en Algérie nécessiterait des investissements importants dans l'infrastructure, la technologie et la réglementation. Cependant, en exploitant pleinement ce potentiel solaire abondant, l'Algérie pourrait non seulement diversifier son mix énergétique, mais aussi réduire sa dépendance aux combustibles fossiles et contribuer à la lutte contre le changement climatique.[28].

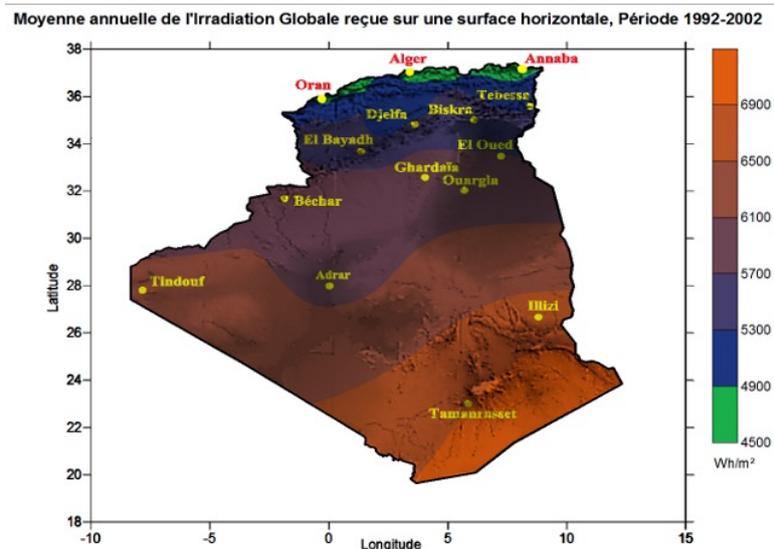


Figure I.3 Répartition de l'irradiation solaire en Algérie [3] .

### I.2.3 Potentiel Solaire

#### I.2.3.1 Définition

Le potentiel solaire est la quantité d'énergie solaire que l'on peut produire à partir d'une surface donnée, en fonction de l'irradiation, de l'exposition et de la présence d'ombrages. Le potentiel solaire varie selon les régions, les saisons et heures de la journée. Elles ont favorisé l'élaboration de modèles de rayonnement solaire. Plus récemment, des recherches se concentrent sur la modélisation du caractère aléatoire du rayonnement solaire en utilisant des réseaux de neurones et l'analyse fractale. Certains travaux ont employé l'insolation tandis que d'autres ont employé la moyenne quotidienne de l'humidité relative, le maximum et le minimum de la température. D'autres travaux sont également réalisés afin d'évaluer le potentiel solaire. Il convient de mentionner les premiers travaux de Liu et Jordan qui ont mis en évidence une corrélation entre l'irradiation solaire diffuse quotidienne et celle globale sur une surface horizontale[22].

#### I.2.3.2 Facteurs qui dépende le potentiel solaire

**Ensoleillement** : la quantité d'énergie solaire reçue par une région dépend de sa latitude, de son climat, de la couverture nuageuse et d'autres facteurs météorologique.

**Inclinaison et orientation** : l'angle et l'orientation des surfaces recevant le rayonnement solaire peuvent influencer la quantité d'énergie captée.

**Type de terrain :** La réflectivité du sol (albédo), la topographie et d'autres caractéristiques du terrain peuvent également affecter le potentiel solaire.

**Saisonnalité :** Le potentiel solaire peut varier au fil de l'année en raison des changements saisonniers dans l'ensoleillement et dans la position du soleil dans le ciel.

### I.2.3.3 Outils pour estimer le potentiel solaire

Il existe plusieurs outils pour estimer le potentiel solaire sur les toitures des particuliers ou des bâtiments. Ces outils utilisent généralement des données satellitaires, des modèles mathématiques et des algorithmes d'intelligence artificielle pour calculer la quantité d'énergie solaire disponible sur surface donnée. Voici quelques exemples d'outils que vous pouvez consulter :

**Simulateur solaire :** c'est un outil en ligne qui vous aide à calculer le coût, les économies et rentabilité d'un projet PV en fonction de votre situation géographique, de votre consommation électrique et de la surface de toiture.

**Estimer le potentiel d'énergie solaire :** c'est un didacticiel qui vous apprend à utiliser ArcGIS Pro pour déterminer la quantité de rayonnement solaire reçu par chaque toiture d'un quartier et la quantité d'électricité que pourrait générer chaque toiture si elle était équipée de panneaux solaires.

**Solar Mapper :** C'est un outil développé par Google Cloud qui vise à fournir une estimation précise et rapide du potentiel d'énergie solaire les logements en utilisant des données d'imagerie satellite et de l'intelligence artificielle.



Figure I.4 *Solar Mapper*[4].

### I.2.4 Spectre Solaire

La lumière du soleil est une onde électromagnétique qui peut se propager dans le vide sans support matériel avec une célérité  $c = 3.108 \text{ m/s}$ . Les ondes lumineuses comprennent les radiations visibles, ultraviolettes et infrarouges, ce qui correspond globalement au spectre solaire, L'énergie d'un photon est donnée par la relation (I.1)[29] :

$$E = h.v = \frac{h.c}{\lambda}(J) \quad (\text{I.1})$$

L'unité couramment utilisée pour mesurer l'énergie d'un photon est le joule (J), qui est l'unité SI d'énergie.

Où:  $h$ : est la constante de Planck, une valeur approximative de  $6,62607015 \times (10)^{-34}$  joule-seconde (J·s) dans le Système international d'unités (SI).

$C$  : la vitesse de la lumière(m/s), approximativement égale à 299 792 458 mètres par seconde.

$\lambda$ : la longueur d'onde (m).

$V$ : la fréquence de photon.

D'après cette formule on constate que plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte a valu à Albert Einstein le prix Nobel en 1905[30]. La relation entre le joule et l'électronvolt est la suivante :  $1 \text{ eV} = 1,602176634 \times 10^{-19}(J)$ [30]. Ainsi, les énergies des photons peuvent être exprimées en électronvolts, en particulier dans le domaine de l'optique et de la physique des particules. Il est important de noter que d'autres unités d'énergie, telles que le kilowatt-heure (kWh) ou la calorie (cal), peuvent également être utilisées selon le contexte spécifique.

## I.3 Cellules solaires

### I.3.1 Définition

Également connues sous le nom de cellules PV, sont des dispositifs électroniques qui convertissent la lumière du soleil en électricité. Elles sont composées de matériaux semi-conducteurs tels que silicium et peuvent être utilisées pour produire de l'énergie solaire dans une d'application, allant des petits appareils électroniques aux grands systèmes d'alimentation électrique [31].

### I.3.2 Matériaux semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux qui ont la capacité de conduire ou d'isoler le courant électrique selon les conceptions. Ils sont utilisés dans les panneaux solaires pour convertir l'énergie lumineuse du soleil en l'énergie électrique.

#### Principales étapes pour la conversion PV.

1. Les photons de la lumière solaire frappent les atomes des semi-conducteurs et leur transfèrent de l'énergie.
2. Cette énergie permet aux électrons des semi-conducteurs de se libérer de leurs liaisons atomiques et de se déplacer librement.
3. Les électrons libres sont captés par des contacts métalliques et forment un courant électrique continu.
4. Ce courant peut être utilisé directement ou transformé en courant alternatif par onduleur.

### I.3.3 Différents types de cellules solaires

Il existe plusieurs types de cellules solaires, basés sur différents matériaux et technologies, voici quelques exemples :

#### I.3.3.1 A base silicium

**Cellules en silicium monocristallin :** Sont formées d'un seul cristal de silicium. Elles ont un rendement élevé (environ 0.25 en laboratoire) et une durée de vie longue (plus de 30 ans), mais elles sont aussi plus chères que les autres types de cellules [32].

**Cellules en silicium poly cristallin :** Elles sont composées de plusieurs cristaux de silicium et ont un rendement inférieur au monocristallin (environ 0.20 en laboratoire et 0.15 en commercialisation) mais sont moins chères à produire [32].

**Cellules en silicium amorphe:** Elles sont constituées d'une couche mince de silicium non cristallisé et ont un rendement faible environ (0.13 en laboratoire et 0.9 en commercialisation) mais sont bon marché, souples et moins chères à produire [32].

### I.3.3.2 Autres matériaux

**Les cellules à base de sélénure de cuivre –indium Les cellules à base de sélénure de cuivre-indium (CIS)** ou de sélénure de cuivre, d'indium et de gallium Sélénure de cuivre d'indium et de gallium (CIGS): Sont des cellules couche mince qui présentent un bon compromis entre rendement, coût et stabilité. Elles sont adaptées aux applications flexibles et légères.

**Les cellules à base de tellure de cadmium Les cellules à base de tellure de cadmium (CdTe):** Sont également des cellules à couche mince qui offrent un rendement élevé et un faible coût de fabrication. Elles sont surtout utilisées pour les grandes centrales solaires, mais présentent des risques environnementaux liés à la toxicité du cadmium.

**Les cellules à base de pérovskites :** Sont des cellules à couche mince qui utilisent des matériaux organiques et inorganiques. Elles ont un potentiel de rendement très élevé et un coût de production très faible, mais elles sont encore en phase de recherche et de développement. Elles souffrent de problèmes de stabilité, de durabilité et de compatibilité avec d'autres technologies.

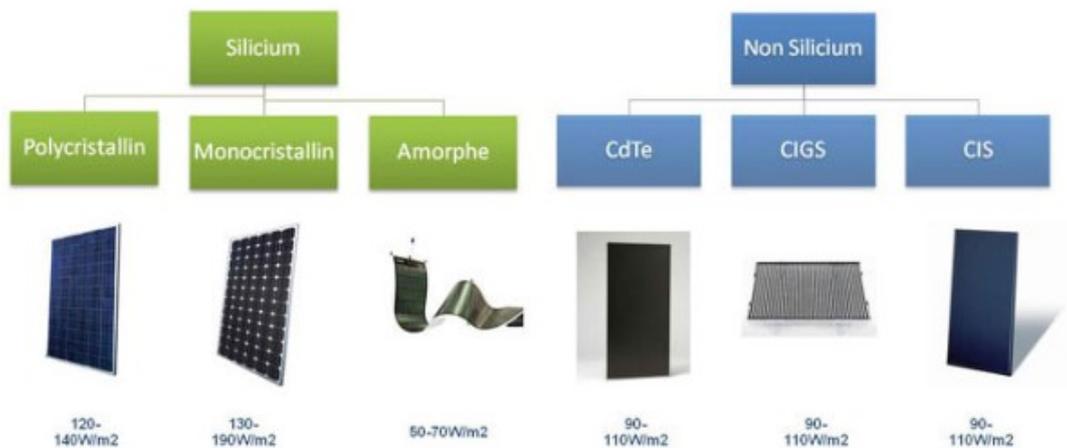


Figure I.5 Types de cellules solaires à base de silicium [5].

## I.4 Protection classique d'un GPV

### I.4.1 Définition d'un GPV

Un ensemble de modules PV reliés entre eux, qui convertissent l'énergie solaire en électricité. Ce système peut être raccordé au réseau électrique public ou fonctionner de manière autonome, avec ou sans dispositif de stockage tel qu'une batterie [33].

### I.4.2 L'importance de la protection d'un GPV

La protection d'un GPV est nécessaire pour assurer la sécurité des personnes et des biens contre les risques électriques, tels que les chocs électriques, les surintensités, les court-circuits et les effets thermiques. Cette protection dépend de la tension, du courant, du mode de raccordement et de l'environnement du système photovoltaïque.

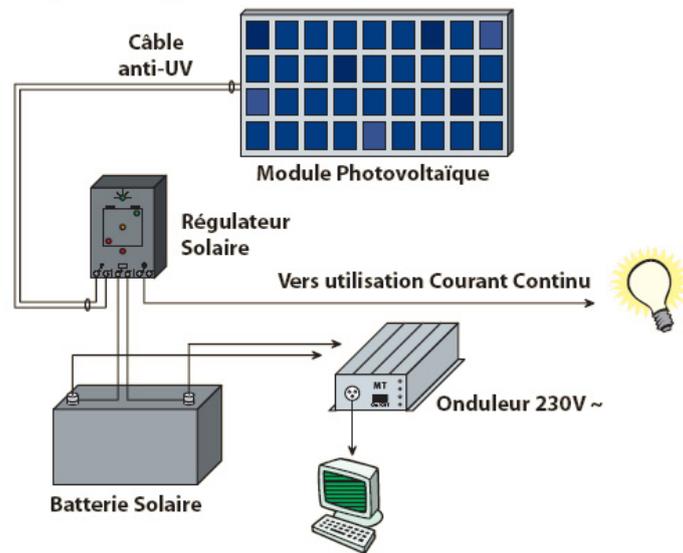


Figure I.6 *Principe de fonctionnement d'un GPV [6].*

### I.4.3 Système de protection d'un GPV

Pour garantir la sécurité électrique d'un générateur photovoltaïque et assurer son fonctionnement en cas d'ombrage, il existe deux types de dispositifs de protection. Il existe deux méthodes de protection.

#### I.4.3.1 Diode de dérivation

Pour atténuer les effets de l'ombrage sur les panneaux photovoltaïques PV, les fabricants intègrent une ou plusieurs diodes de dérivation (bypass (BP) en anglais) dans les panneaux commerciaux. Ces diodes sont connectées en antiparallèle avec les chaînes de cellules solaires, reliant les bornes de sortie positive et négative. Chaque diode est généralement utilisée pour un petit groupe de cellules connectées en série (contre la polarisation inverse) [34].

### I.4.3.2 Diode anti-retour

Un diode anti-retour, aussi connue sous le nom de diode de protection ou diode de roue libre, est un élément électronique qui empêche le courant de circuler dans le sens inverse dans un circuit. met en série avec le GPV pour la protection en cas d'une décharge vers le GPV [19].

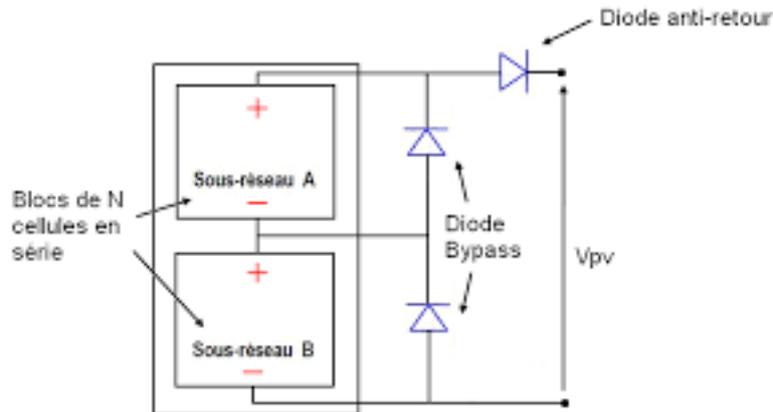


Figure I.7 *Système de protection d'un système PV [7].*

## I.5 Systèmes PV avec stockage et sans stockage

Les systèmes basés sur la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire, qu'ils soient isolés ou connectés au réseau, nécessitent du stockage afin de répondre à la question de l'intermittence de leur production. Les systèmes connectés au réseau présentent une vaste gamme d'applications et, par conséquent, de nombreux modes de stockage possibles, tandis que les solutions techniques pour les systèmes autonomes se concentrent principalement sur les batteries.

Les panneaux solaires avec stockage et sans stockage sont deux options possibles pour utiliser l'énergie solaire produite par les modules photovoltaïques. Voici les principales différences entre les deux options :

### I.5.1 Systèmes PV sans stockage

Les panneaux solaires sont utilisés par les systèmes photovoltaïques sans stockage pour convertir l'énergie lumineuse du soleil en électricité. La lumière solaire pénètre dans les cellules photovoltaïques des panneaux solaires et produit un Courant continu (CC).

Un onduleur convertit le courant continu produit par les panneaux solaires en Courant alter-

natif (CA), qui peut être utilisé dans les équipements électriques domestiques et être compatible avec le réseau électrique public. La première utilisation de l'électricité produite par les panneaux solaires est pour alimenter les appareils électriques de la maison ou du bâtiment. Si la production d'électricité solaire est supérieure à la demande, tout excédent est injecté dans le réseau électrique public. L'électricité est automatiquement fournie par le réseau électrique public lorsque les panneaux solaires ne produisent pas suffisamment d'électricité pour répondre à la demande de la maison ou du bâtiment. Ainsi, les systèmes photovoltaïques PV sans stockage sont connectés au réseau, ce qui permet de compenser les fluctuations de la production solaire en utilisant l'électricité du réseau lorsque nécessaire.

### I.5.2 Systèmes PV avec stockage

- **Fonctionnement** : Les systèmes photovoltaïques PV avec stockage utilisent des batteries pour stocker l'électricité produite par les panneaux solaires. L'électricité produite par les panneaux solaires est utilisée pour alimenter les appareils électriques de la maison ou du bâtiment. Si la quantité d'électricité produite par la maison est supérieure aux besoins immédiats, l'excédent est stocké dans les batteries. Ensuite, lorsque les panneaux solaires ne produisent pas suffisamment d'énergie, comme la nuit ou par temps nuageux, l'électricité stockée dans les batteries peut être utilisée pour alimenter les appareils électriques. Cela garantit un approvisionnement continu en électricité, même dans les cas où la production solaire est limitée ou absente.
- **Avantages de ce stockage** :
  - **Indépendance énergétique** : Ces systèmes sont plus autonomes par rapport au réseau électrique, ce qui peut être particulièrement bénéfique dans les régions où les coupures de courant sont fréquentes.
  - **Maximisation de l'autoconsommation** : Ces systèmes permettent de maximiser l'autoconsommation et de réduire les pertes d'énergie en stockant l'électricité excédentaire pour une utilisation ultérieure.
- **Inconvénients de ce stockage** :
  - **Coût d'installation** : Le coût d'installation initial de ces systèmes augmente considérablement en raison des batteries de stockage.

- **Entretien des batteries** : Les batteries ont une durée de vie limitée et nécessitent un entretien régulier, ce qui peut vous coûter plus tard.
- **Modes de stockage possible dans le système PV:**
  - **Batteries au plomb-acide** : En raison de leur faible coût, ces batteries sont largement utilisées dans les systèmes solaires. Elles sont idéales pour les utilisations commerciales et résidentielles et sont efficaces pour le stockage à court terme.
  - **Batteries lithium-ion** : En raison de leur efficacité, de leur longue durée de vie et de leur densité énergétique élevée, les batteries lithium-ion gagnent en popularité. Elles sont utilisées dans une variété de systèmes solaires, y compris les installations résidentielles, commerciales et industrielles, et elles fonctionnent bien pour les applications nécessitant un stockage prolongé.
  - **Stockage thermique** : Certains systèmes solaires incluent des systèmes de stockage thermique où l'énergie solaire est utilisée pour chauffer un fluide qui peut ensuite être utilisé pour produire de la vapeur et générer de la chaleur.

## I.6 Installations photovoltaïques raccordées au réseau

Les systèmes de ce type sont établis sur des sites qui sont connectés au réseau (Sonelgaz, en Algérie). Dans une maison ou une entreprise qui souhaite utiliser le formulaire d'énergie renouvelable et qui bénéficie d'un bon ensoleillement. Les générateurs photovoltaïques qui sont connectés au réseau n'ont pas besoin de stockage d'énergie. éliminant les liens les plus difficiles et coûteux On distingue divers types d'installations PV raccordées au réseau:

### I.6.1 Types des installation PV raccordées au réseau électrique

- **Installation PV raccordée au réseau avec injection des excédents de production:** Les consommateurs utilisent une partie de leurs biens et injectent le reste dans le réseau. Les clients retirent leur solde du réseau lorsque la consommation dépasse la production. Deux compteurs sont installés dans l'unité : un compteur de soutirage mesure l'énergie extraite du réseau lorsque la consommation dépasse la production, et un compteur d'injection mesure l'énergie injectée dans le réseau[35].

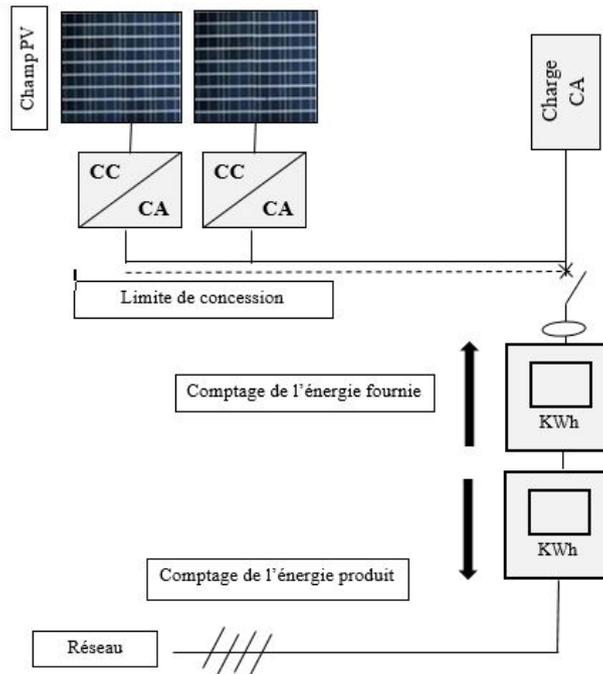


Figure I.8 Schéma de principe de la configuration avec injection des excédents de production.

- **Installation PV raccordée au réseau avec injection totale de l'énergie produite:**

Les panneaux solaires génèrent de l'énergie électrique en continu. Afin d'être injectée sur le réseau, il est nécessaire de convertir cette électricité en courant alternatif. L'onduleur assure cette fonction en transformant le courant continu des modules en courant alternatif qui correspond harmonieusement au courant du réseau[36].

Pour les demandes de retrait du producteur, le champ PV est connecté au réseau via un point de livraison différent du point. Les producteurs peuvent injecter toute l'énergie produite et extraire toute l'énergie nécessaire au réseau. Le câble de production est composé de deux compteurs qui sont installés à la fois pour surveiller la production et la consommation des équipements de la chaîne photovoltaïque. L'un d'entre eux est chargé de l'énergie de la source photovoltaïque afin de faciliter l'utilisation. Installation (compteur électrique fourni au client) et production (comptage de l'énergie produite par le client).

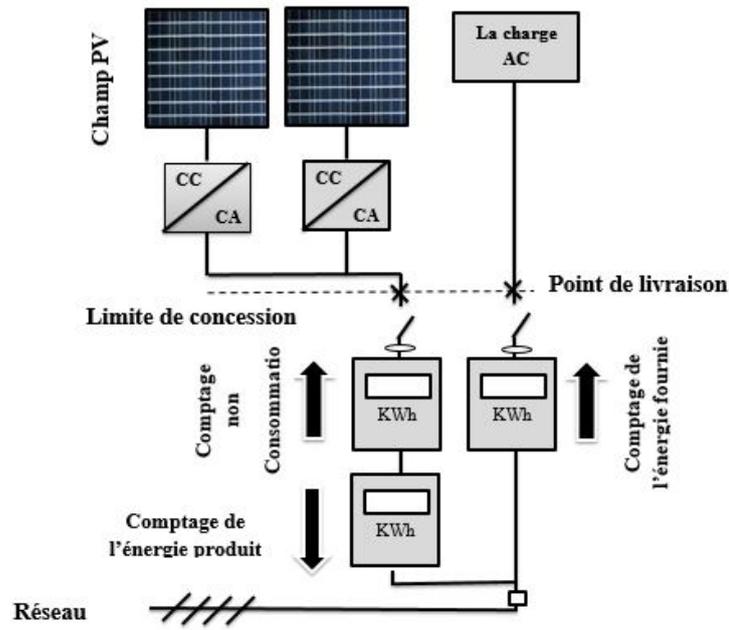


Figure I.9 Schéma de principe de la configuration d'injection totale d'énergie.

- Installation PV raccordée au réseau sans injection:** Les installations photovoltaïques résidentielles peuvent être raccordées au réseau sans injection de production. Au cas où la production d'énergie photovoltaïque du petit système serait insuffisante, l'énergie générée par le système photovoltaïque est utilisée pour son propre usage. Le manque d'énergie consommée est comblé par l'énergie extraite du réseau.

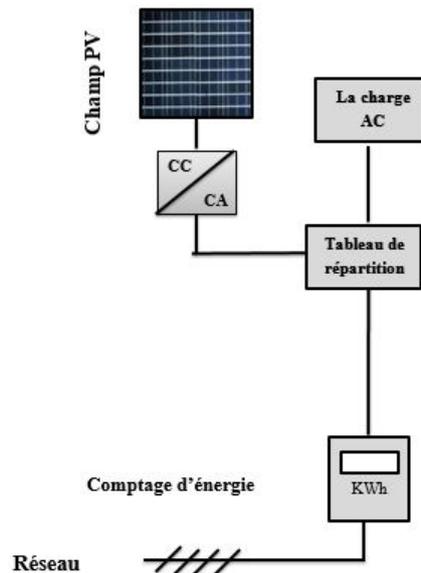


Figure I.10 Schéma de principe de la configuration sans injection de l'énergie.

### I.6.2 Systèmes PV connectés au réseau sans stockage

Ces systèmes doivent être connectés les uns aux autres et fonctionner en parallèle avec le réseau public. L'onduleur est le principal composant de ce type de système. Il respecte les conditions de tension et de puissance de l'alimentation du réseau tout en convertissant le courant continu CC produit par les modules photovoltaïques en alimentation alternative.

Il peut s'arrêter automatiquement lorsque le réseau ne fonctionne pas. Cela permet de générer de l'électricité alternative à partir de systèmes photovoltaïques, de fournir toutes les charges électriques directement ou d'injecter le surplus de puissance PV dans le réseau lorsque cela est nécessaire. Lorsque la demande des consommateurs est supérieure à la production PV, la nuit ou en cas de faible ensoleillement, le réseau fournit l'appoint nécessaire pour atteindre un bilan énergétique.

### I.6.3 Systèmes PV connectés au réseau avec stockage

Le système photovoltaïque avec stockage est souvent raccordé au réseau. La topologie comprend un système de stockage qui peut être utilisé en cas de panne du réseau. L'énergie produite est fournie aux utilisateurs sur site, la plus grande partie est stockée dans les batteries jusqu'à sa limite de charge, puis la plus grande partie est injectée dans le réseau. Utiliser le réseau public si la production et le stockage sont insuffisants pour alimenter toutes les charges.

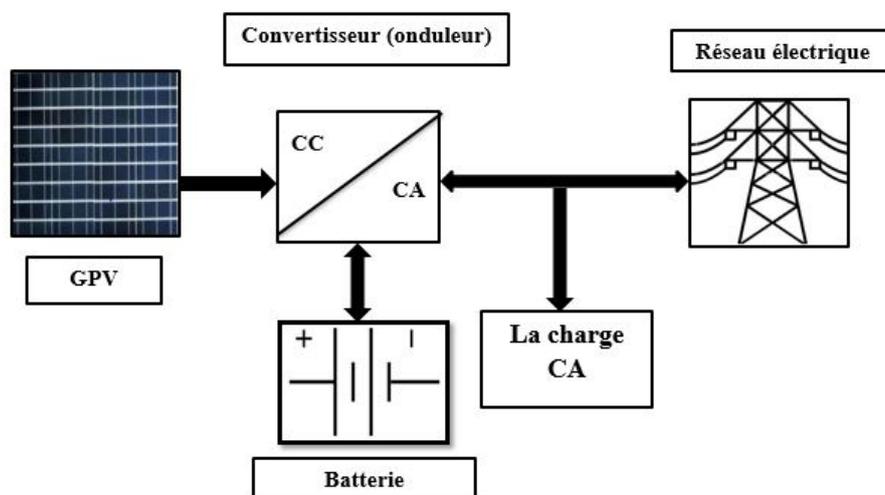


Figure I.11 *Systèmes PV connectés au réseau avec batterie.*

## I.7 Avantages et Inconvénients de l'installation PV

### I.7.1 Avantages:

Il existe de nombreux avantages à l'installation de panneaux photovoltaïques, tels que :

- **Énergie renouvelable :** Les panneaux solaires consomment de l'énergie solaire, qui est une source abondante et renouvelable. Ils jouent un rôle dans la diminution de notre dépendance envers les combustibles fossiles et les sources d'énergie non renouvelables.
- **Réduction des émissions de gaz à effet de serre :** Les panneaux solaires réduisent la pollution de l'air et atténuent le changement climatique en produisant de l'électricité sans produire de gaz à effet de serre.
- **Économies sur les factures d'électricité :** Les propriétaires de panneaux solaires peuvent réduire leur dépendance vis-à-vis des fournisseurs d'électricité et réaliser des économies sur leurs factures d'électricité à long terme en produisant de l'électricité gratuite à partir de la lumière du soleil.
- **Augmentation de la valeur des biens immobiliers :** En raison de leur efficacité énergétique accrue et de leurs coûts d'exploitation réduits, les maisons équipées de panneaux solaires ont tendance à être plus valorisées sur le marché immobilier.
- **Indépendance énergétique :** Les propriétaires de panneaux solaires peuvent devenir plus indépendants sur le plan énergétique en produisant leur propre électricité, ce qui les rend moins vulnérables aux fluctuations des prix de l'énergie et aux pannes de courant.
- **Soutien à l'emploi local :** L'installation, la maintenance et la fabrication de panneaux solaires stimulent l'économie locale et créent des emplois locaux.
- **Durabilité et longévité :** Les panneaux solaires ont une durée de vie moyenne d'environ 25 à 30 ans et nécessitent peu d'entretien, ce qui en fait une solution durable et rentable à long terme.
- **Flexibilité d'installation :** Les panneaux solaires peuvent être installés sur une variété de surfaces, y compris les toits des maisons et des bâtiments, les terrains non utilisés, les auvents de voiture, etc., ce qui permet une utilisation flexible de l'espace disponible.

### I.7.2 Inconvénients

- **Coût initial élevé** : Bien que les coûts de l'installation de panneaux solaires aient considérablement diminué ces dernières années, l'investissement initial peut être important.
- **Dépendance aux conditions météorologiques** : Les conditions météorologiques telles que l'ensoleillement et les nuages affectent l'énergie solaire. En conséquence, la production d'électricité peut varier selon la saison, les jours nuageux et la nuit.
- **Espace requis** : Pour répondre aux besoins énergétiques d'un foyer ou d'une entreprise, les installations solaires nécessitent souvent une grande surface de toiture ou de terrain.
- **Intermittence de la production** : Les panneaux solaires ne peuvent pas être contrôlés en fonction de la demande car leur production d'électricité est intermittente. L'intégration des systèmes solaires dans le réseau électrique peut être difficile en raison de cela.
- **Nécessité de stockage ou de connexion au réseau** : Il est fréquemment nécessaire d'intégrer des systèmes de stockage d'énergie ou d'être connecté au réseau électrique pour compenser l'intermittence de la production solaire, ce qui peut entraîner des coûts supplémentaires.
- **Problèmes esthétiques** : Certains propriétaires peuvent considérer les panneaux solaires comme peu esthétiques ou incompatibles avec le design de leur maison ou de leur bâtiment.
- Les batteries peuvent être coûteuses à produire et à acheter, bien que les prix aient tendance à diminuer avec le temps.
- Le recyclage des batteries est complexe et coûteux, et tous les matériaux ne peuvent pas être récupérés efficacement

## Conclusion

Dans ce chapitre, les concepts fondamentaux de l'énergie photovoltaïque sont discutés, soulignant son potentiel sous-utilisé malgré l'abondance de l'énergie solaire disponible. Les principes de base, y compris l'effet photovoltaïque, la constitution d'un générateur photovoltaïque et les paramètres électriques des modules solaires, sont présentés. Différents types de systèmes

photovoltaïques sont abordés, ainsi que leurs topologies et leurs applications, avec un accent particulier sur les systèmes connectés au réseau. Ce chapitre offre une compréhension approfondie des bases et des applications pratiques de l'énergie photovoltaïque.

Chapitre II:  
Modélisation d'un système PV

## Introduction

Depuis l'avènement de l'électricité, la consommation d'énergie n'a cessé de croître. Face à ce constat et aux défis de la conversion et du stockage d'énergie, la recherche et le développement de nouvelles sources d'approvisionnement s'avèrent cruciaux. Dans ce contexte, le système photovoltaïque se présente comme une solution prometteuse grâce à l'exploitation de l'énergie solaire. Un système photovoltaïque typique se compose de trois éléments principaux :

- Un générateur photovoltaïque : qui convertit l'énergie lumineuse du soleil en électricité.
- Un hacheur : qui adapte la tension et le courant produits par le générateur aux besoins de l'onduleur.
- Un onduleur : qui convertit le courant continu produit par le générateur en courant alternatif compatible avec le réseau électrique.

Le système photovoltaïque étudié fonctionne en fonction de l'ensoleillement. Ce chapitre se propose de présenter la modélisation et la simulation individuelles de chaque élément constituant l'architecture du système photovoltaïque (générateur photovoltaïque, hacheur et onduleur)[37].

### II.1 Modélisation d'un Générateur photovoltaïque

Dans la plupart des cas, les cellules solaires sont combinées en série et en parallèle, puis enveloppées dans du verre pour créer un module photovoltaïque. Un générateur photovoltaïque est un ensemble de modules qui sont connectés pour former une unité qui produit une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique courant. Pour augmenter la tension et l'intensité de la sortie du générateur, les modules photovoltaïques sont généralement connectés en série-parallèle.

La caractéristique I-V du générateur photovoltaïque est donc basée sur celle d'une cellule élémentaire, modélisée par le circuit équivalent bien connu de la figure II.1. Ce circuit introduit une diode et une source de courant en parallèle [38]. Deux types de résistances sont également ajoutées pour modéliser les pertes d'énergie qui se produisent dans la cellule.

- **Résistance série  $R$** : représente la résistance interne du matériau semi-conducteur de la

cellule. Elle affecte le courant électrique généré par la cellule [39].

- **Résistance parallèle  $R_{sh}$** : représente les fuites de courant qui se produisent entre les différentes couches de la cellule. Elle affecte la tension électrique générée par la cellule[39].

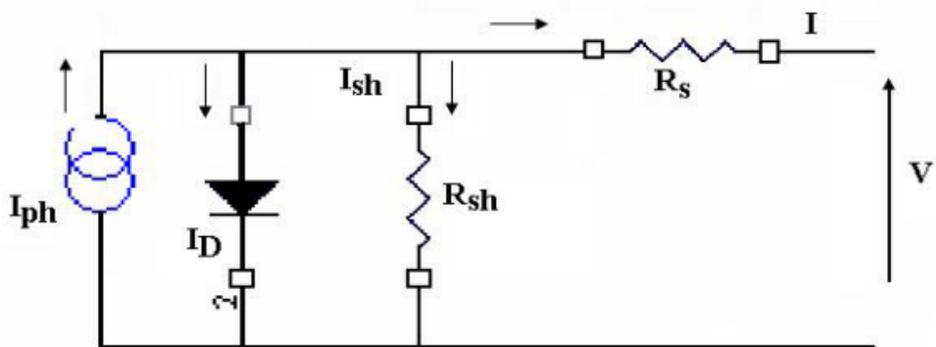


Figure II.1 *Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque*[8].

La résistance série provient de la combinaison des résistances des matériaux de base et des frontières de jonction, ainsi que des contacts sur les faces avant et arrière de la cellule. La résistance parallèle prend en compte les contacts sur les faces avant et arrière de la cellule, sa valeur diminue du fait de la pénétration des impuretés métalliques dans la jonction, surtout lorsque cette pénétration est profonde. Ce modèle électrique est valable aussi bien pour une cellule individuelle que pour un module ou un panneau composé de plusieurs modules. L'équation décrivant la relation entre le courant fourni par un module photovoltaïque, constitué par la mise en série de  $N_s$  cellules, et la tension à ses bornes, est la suivante [40].

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V + IR_s}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.1})$$

Dans cette équation, les variables ( $I_{ph}$ ), ( $I_0$ ) et ( $V_T = \frac{N_s \cdot n \cdot k \cdot T}{q}$ ) représentent respectivement le photo-courant, le courant saturation inverse de la diode et la tension thermique. Dans cette équation, ( $n$ ) représente le facteur d'idéalité de la diode, ( $q$ ) représente la charge de l'électron, ( $k$ ) représente la constante de Boltzmann, et ( $T$ ) représente la température de la cellule, qui varie en fonction de l'éclairement et de la température ambiante, selon une relation linéaire [8].

$$T - T_a = \left( \frac{T_{fn} - 20}{800} \right) \cdot \Psi \cdot (W/m^2) \quad (\text{II.2})$$

où  $T_{fn}$  est la température de fonctionnement normale ( $^{\circ}\text{C}$ ) de la cellule photovoltaïque sous une lumière solaire de  $800\text{W}/\text{m}^2$ , une température ambiante de  $20^{\circ}\text{C}$  et des conditions d'éclairage et d'air. La valeur  $T_{fn}$  est généralement spécifiée par le fabricant, où  $T_a$  est la température ambiante et  $\Psi(\text{W}/\text{m}^2)$  est la quantité solaire totale. radiation. Visualisez et captez l'énergie solaire sur place grâce à des modules solaires. Une méthodologie simple a été développée sur la base de cette équation. Déterminer les caractéristiques d'une cellule ou d'un panneau photovoltaïque. Nous introduisons deux paramètres externes à la cellule (facilement mesurables) : Déterminer le courant de court-circuit continu  $I$  et la tension en circuit ouvert  $V_{co}$ . Une expression mathématique implicite du courant généré par une cellule photovoltaïque ; Il en va de même pour les caractéristiques courant-tension. Le courant de court-circuit est le courant par lequel la tension est appliquée. La cellule ou le générateur vaut 0. L'expression approximative est:

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (\text{II.3})$$

À des niveaux d'éclairement courants de valeur  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , le courant photoélectrique est directement proportionnel à l'irradiance solaire ou au flux lumineux  $\Psi$  (exprimé en  $\text{W}/\text{m}^2$ ). Dans un scénario idéal, ce courant photoélectrique correspond au courant de court-circuit et peut être simplement exprimé comme suit :

$$I_{cc} = I_{co0} \cdot \left( \frac{\Psi}{1000} \right) \quad (\text{II.4})$$

Cela illustre la relation linéaire entre l'intensité du courant généré par une cellule photovoltaïque et l'éclairement auquel elle est exposée.

Le courant de court-circuit, noté ( $I_{co0}$ ), correspond au courant généré par une cellule photovoltaïque lorsqu'elle est exposée à une irradiation solaire standard de ( $1000, \text{W}/\text{m}^2$ ). En d'autres termes, c'est le courant maximal que la cellule peut fournir dans ces conditions.

Quant à la tension de circuit ouvert, elle représente la tension aux bornes de la cellule lorsque le courant qui en sort est nul. C'est essentiellement la tension maximale que la cellule peut atteindre sans qu'aucun courant ne circule. Dans un scénario idéal, cette tension de circuit ouvert est légèrement inférieure à une valeur spécifique, mais elle dépend des caractéristiques de

la cellule et des conditions environnementales, Dans le cas idéal, elle est légèrement inférieure à:

$$V_{co} = V_T \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{II.5})$$

En utilisant les équations II.3 à II.5, l'équation II.1 devient :

$$I = I_{cc} \cdot \left( \alpha - \beta \left( e^{y(V - V_{co} + R_s \cdot I)} - 1 \right) \right) - (V + I \cdot R_s) / R_{sh} \quad (\text{II.6})$$

avec  $\alpha = \frac{\Psi}{1000}$  ,  $\beta = 1 + \frac{R_s}{R_{sh}}$  et  $y = \frac{1}{V_T}$ .

La température joue un rôle crucial dans le comportement des cellules photovoltaïques. En se référant au modèle proposé par Sukamongkol et al, nous pouvons l'intégrer dans l'équation II.6 :

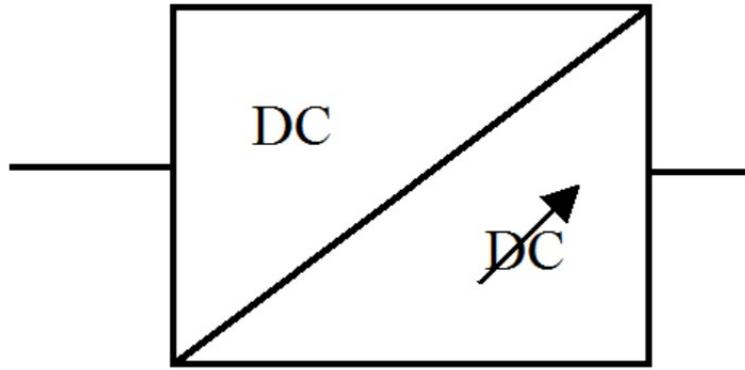
$$I = I_{cc} \cdot \left( \alpha - \beta \left( e^{y(V - V_{co} + R_s \cdot I)} \right) \right) + \lambda(T - T_{ref}) - (V + I \cdot R_s) / R_{sh} \quad (\text{II.7})$$

## II.2 Modélisation de Convertisseurs DC-DC (hacheurs)

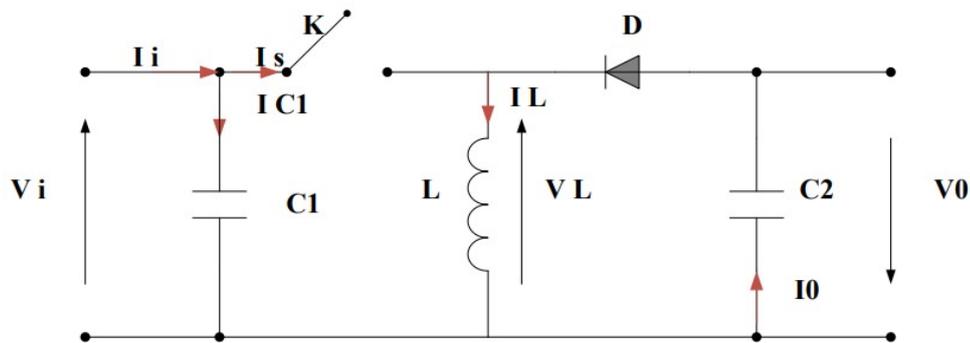
Les hacheurs sont des convertisseurs de type continu-continu qui permettent de réguler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu. Ils offrent une grande flexibilité et un rendement élevé.

Les convertisseurs DC/DC à haut rendement jouent un rôle crucial dans les systèmes d'énergie verte en augmentant les faibles tensions d'entrée aux niveaux plus élevés requis pour diverses applications, telles que celles alimentées par des panneaux photovoltaïques solaires et des piles à combustible. Les méthodes traditionnelles pour obtenir des gains de tension élevés impliquent souvent l'utilisation de cycles de fonctionnement extrêmes, ce qui entraîne des pertes accrues, des coûts plus élevés et une dégradation des performances du système, aboutissant à une faible efficacité[41].

La figure II.2 illustre le symbole d'un convertisseur DC-DC. Le hacheur, également appelé convertisseur DC-DC, est constitué de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans un scénario idéal, ces composants ne consomment aucune puissance active, ce qui explique les bons rendements obtenus avec les hacheurs . La technique de découpage a résolu les problèmes liés au mauvais rendement et à l'encombrement des alimentations série. Dans une alimentation à découpage (voir figure II.3), la tension d'entrée est "hachée" à une fréquence donnée par un

Figure II.2 *Symbole d'un convertisseur DC-DC.*

transistor qui alterne entre état passant et bloqué. Cela génère une onde carrée de tension, qu'il suffit ensuite de lisser pour obtenir une tension continue stable. Il existe divers types de

Figure II.3 *Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.*

convertisseurs DC-DC couramment utilisés dans les systèmes photovoltaïques PV pour générer les tensions et les courants souhaités, ainsi que pour adapter les panneaux solaires à différentes charges. Parmi ces types, je vous présente le principe du convertisseur survolteur.

### II.2.1 Modélisation du hacheur survolteur(boost)

Le convertisseur survolteur, également appelé hacheur Boost ou hacheur parallèle, est un circuit électrique permettant d'augmenter la tension d'une source continue[9]. Le convertisseur survolteur est composé de:

- Une source d'entrée continue: généralement une batterie ou une alimentation électrique.

- Une inductance: stocke l'énergie sous forme de champ magnétique.
- Un interrupteur commandé: généralement un transistor.
- Une diode: permet de bloquer le courant dans un sens.
- Un condensateur: stocke l'énergie sous forme de charge électrique.
- Une charge résistive: représente l'appareil que le convertisseur alimente.

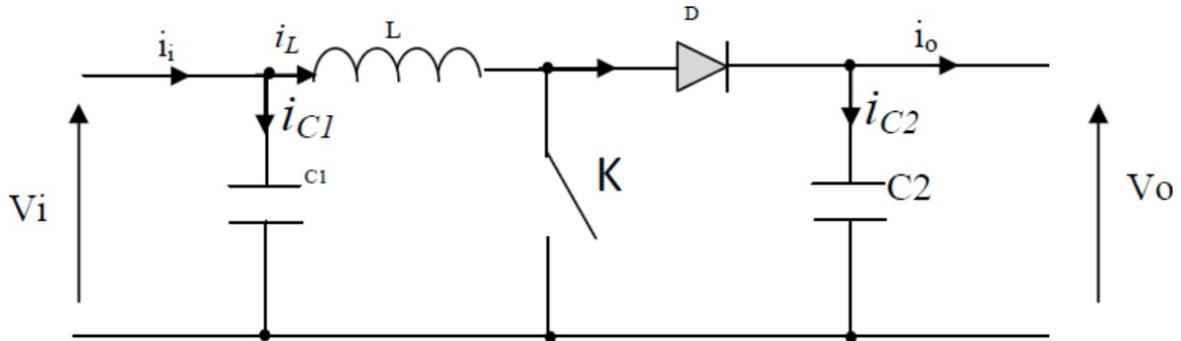


Figure II.4 Schéma de principe d'un convertisseur Boost [9].

En traitant les circuits équivalents du convertisseur survolteur pour ses deux phases de fonctionnement avec les lois de Kirchhoff, nous obtenons les systèmes d'équations suivants [9] :

Pour la première intervalle  $[0, \alpha T]$

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_{c1}(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_{c2}(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_i(t) \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Pour la deuxième intervalle  $[\alpha T, T]$

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_{c1}(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_{c2}(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

En utilisant la relation  $\frac{dx}{dt}T_s = \frac{dx}{dT\Delta T_s}dT_s + \frac{dx}{dt(1-D)T_s}(1-d)T_s$  sur les systèmes d'équations II.8 et II.9, le modèle approximatif du convertisseur survolteur est trouvé :

$$\begin{cases} i_L = i_i - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ i_o = (1-d)i_L - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} \\ v_i = L \frac{di_L(t)}{dt} + (1-d)V_0 \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

### II.2.2 Modélisation du hacheur dévolteur (Buck)

La figure II.5 montre la structure de base du hacheur dévolteur. Il est composé de quatre éléments principaux : une inductance (L), un transistor qui sert de commutateur (S), une diode (D) et un condensateur (C). Le condensateur se remplit d'énergie grâce au transistor qui maintient une tension constante à ses bornes. Lorsque le transistor s'ouvre, le condensateur libère son énergie vers la charge en passant par la diode. Ce processus se répète à chaque cycle de la période de fonctionnement [42].

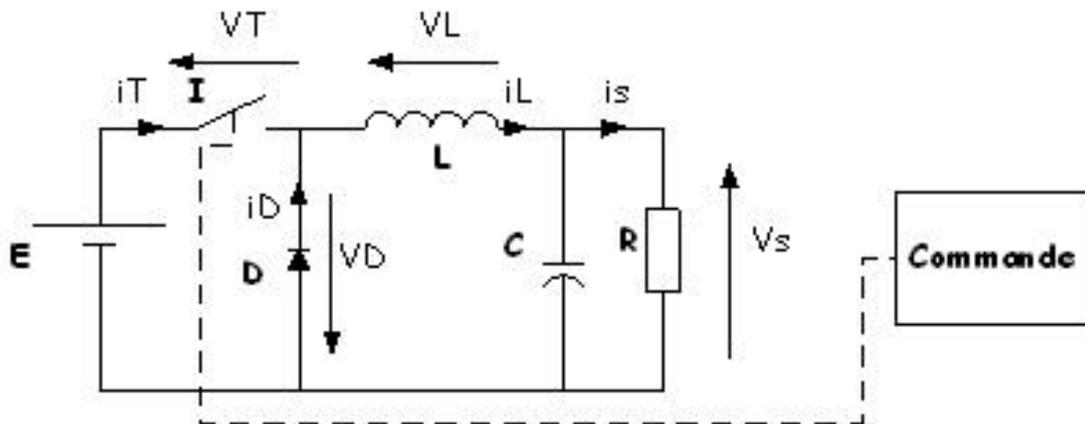


Figure II.5 Circuit électrique de base du hacheur dévolteur(buck) [10].

Le convertisseur survolteur utilise un interrupteur, généralement un transistor MOSFET ou IGBT, pour commuter entre deux états:

- Marche : Le transistor est conducteur et le courant circule dans l'inductance. L'inductance stocke l'énergie sous forme de champ magnétique.
- Arrêt : Le transistor est bloqué et le courant ne circule plus dans l'inductance. Le champ magnétique de l'inductance s'effondre et génère une tension aux bornes de l'inductance.

Cette tension s'ajoute à la tension de la source d'entrée et permet d'augmenter la tension de sortie.

Le processus de commutation est contrôlé par un signal Pulse Width Modulation (PWM) qui détermine la durée pendant laquelle le transistor est conducteur.

**Durant la période de conduction ( $\alpha T$ ):**

- Le transistor est en saturation et le courant circule dans l'inductance.
- L'inductance stocke l'énergie sous forme de champ magnétique.
- Le courant  $I_L$  augmente.

**Durant la période de blocage  $(1 - \alpha)T$ :**

- Le transistor est bloqué et le courant ne circule plus dans l'inductance.
- Le champ magnétique de l'inductance s'effondre et génère une tension aux bornes de l'inductance.
- Cette tension s'ajoute à la tension de la source d'entrée et permet d'augmenter la tension de sortie.
- Le courant  $I_L$  diminue.

### II.2.3 Modélisation du hacheur Buck-Boost)

Le convertisseur Buck-Boost est un type d'alimentation à découpage capable de convertir une tension continue d'entrée (plus faible) en une tension continue de sortie (plus grande).

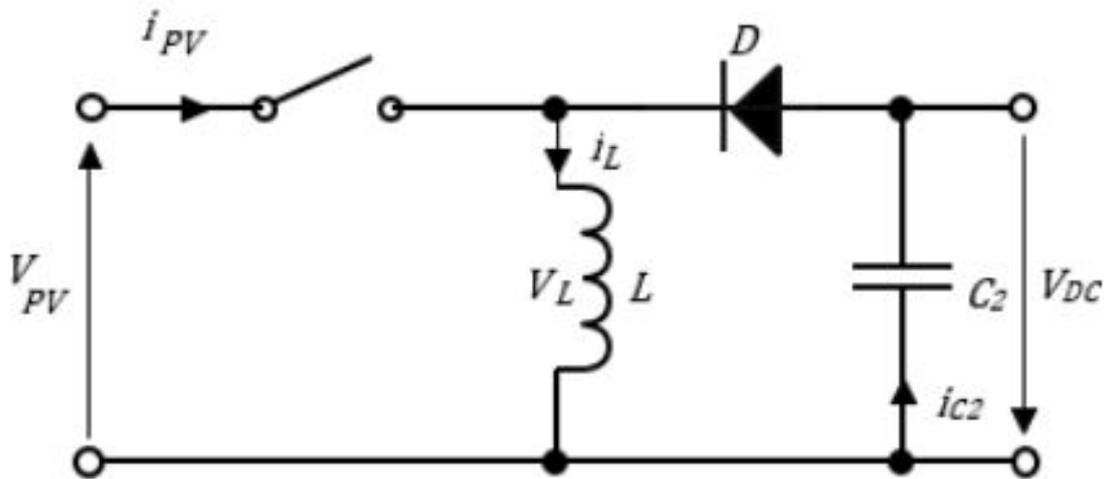


Figure II.6 *Circuit électrique du hacheur buck-boost [11].*

Le convertisseur Buck-Boost offre une grande flexibilité pour la conversion de tension continue, mais son inconvénient de commande le rend moins accessible que d'autres types de convertisseurs. Des solutions existent pour simplifier la commande et améliorer la performance du convertisseur, mais elles peuvent s'avérer plus coûteuses et complexes à mettre en œuvre [43].

### II.3 Modélisation de Convertisseurs DC-AC (Onduleur)

Un onduleur est un dispositif électronique de puissance qui convertit l'énergie électrique continue (DC) en alternative (AC). Il permet d'alimenter des charges en courant alternatif, comme les appareils électroménagers ou les moteurs électriques, à partir d'une source d'énergie continue, comme une batterie ou un panneau solaire.

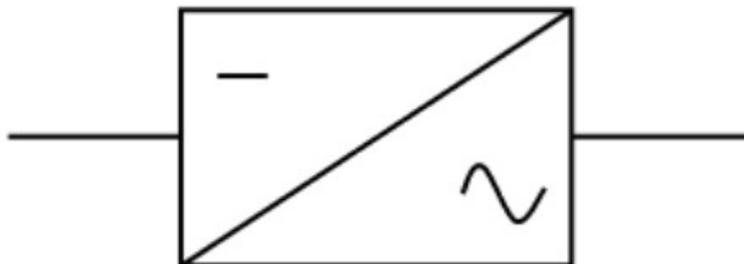


Figure II.7 *Schéma symbolique d'un onduleur.*

Le principe de fonctionnement d'un onduleur repose sur l'utilisation de composants semi-

conducteurs commandables (transistors, thyristors, etc.). Ces composants permettent de commuter l'énergie électrique de manière rapide et précise, créant ainsi une tension alternative à partir d'une tension continue.

### II.3.1 Classification des onduleurs Selon la réversibilité

#### II.3.1.1 Onduleur autonome (non raccordé au réseau électrique)

Un onduleur autonome est un système capable de convertir l'énergie électrique continue en une tension alternative dont la fréquence peut être fixe ou ajustable par l'utilisateur. L'onduleur autonome utilise un circuit auxiliaire pour fournir l'énergie nécessaire à la commutation des thyristors ou autres semi-conducteurs qui contrôlent le flux d'énergie. Ce circuit auxiliaire peut être alimenté par une batterie, un panneau solaire ou une autre source d'énergie continue.

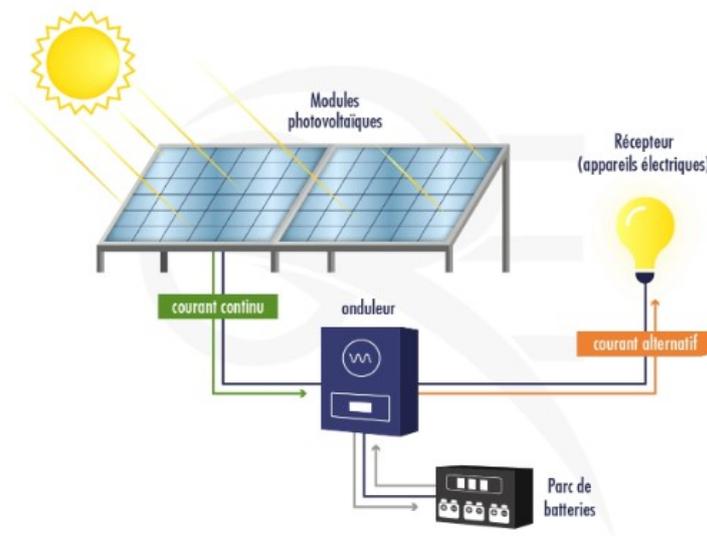


Figure II.8 *Système photovoltaïque non raccordé au réseau*[12].

#### II.3.1.2 Onduleurs non autonome (raccordés aux réseaux)

Un onduleur réseau convertit une tension continue en une tension alternative, mais avec une fréquence et une valeur identiques à celles du réseau électrique. L'onde de sortie est sinusoïdale et doit se synchroniser avec le réseau pour garantir la sécurité et l'efficacité du système.

Deux techniques de génération du signal alternatif existent:

## 1. Synchronisation par passage à zéro:

- L'onduleur génère sa propre sinusoïde et se synchronise avec le réseau en utilisant le passage à zéro de la tension du réseau.
- Cette technique est simple et efficace, mais elle peut générer des perturbations harmoniques sur le réseau.

## 2. Synchronisation par le réseau:

- L'onduleur utilise le réseau comme source de signal et de synchronisation.
- Cette technique est plus complexe, mais elle réduit les perturbations harmoniques et améliore la qualité de l'énergie injectée dans le réseau.

Certains onduleurs utilisent un transformateur pour isoler les panneaux solaires du réseau. Cette isolation permet d'améliorer la sécurité et de réduire les risques de fuite de courant.

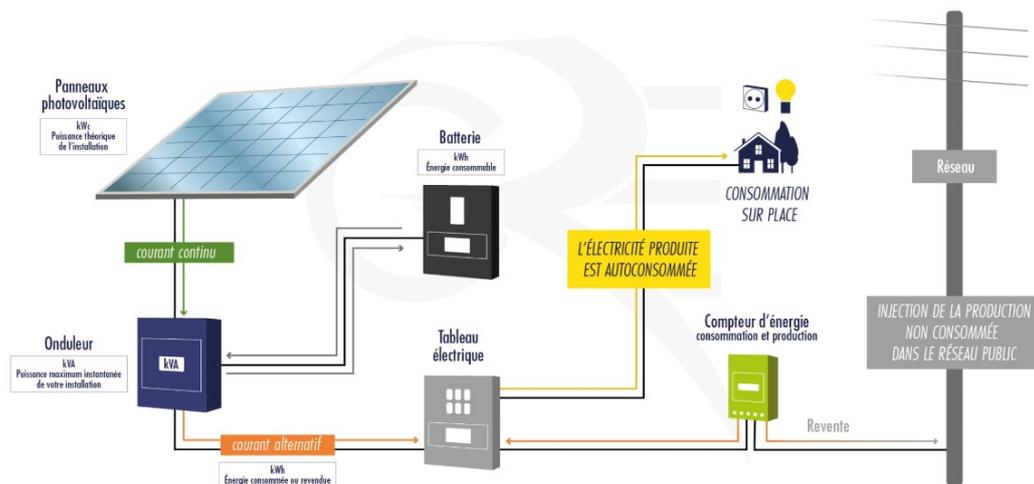


Figure II.9 *Système photovoltaïque connecté au réseau [12].*

### II.3.2 Modélisation d'un onduleur monophasé

L'onduleur monophasé est constitué d'une source de tension continue et de commutateurs commandés, qui sont reliés à un circuit contenant des diodes. Le circuit équivalent de l'onduleur monophasé est illustré dans la figure II.10 [44].

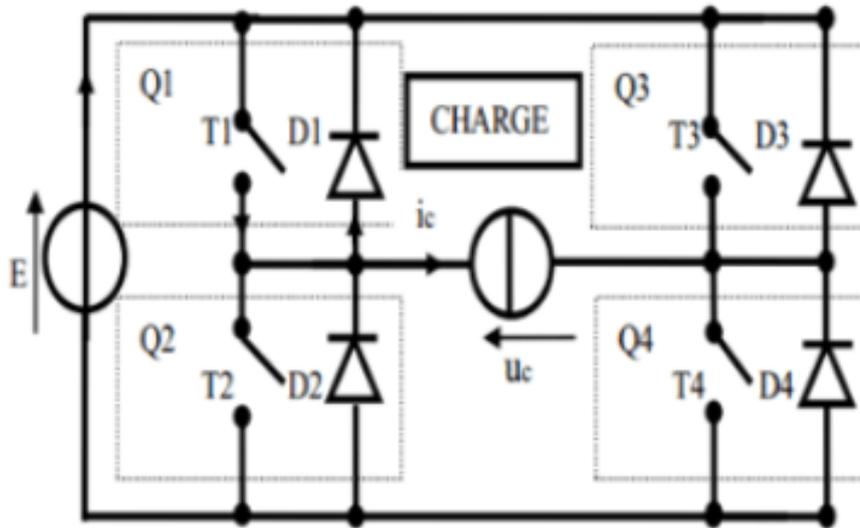


Figure II.10 *Circuit d'Onduleur monophasé en pont complet [13].*

### II.3.2.1 Le modèle mathématique

La tension aux bornes d'un circuit composé d'une résistance et d'une bobine est la somme de la tension résistive et de la tension inductive :

$$u(t) = R \times i(t) + L \times \frac{di}{dt} \quad (\text{II.11})$$

En intégrant cette équation, on obtient :

$$i(t) = \exp\left(-\frac{R}{L}t\right) + cst \quad (\text{II.12})$$

La solution particulière de l'équation est de la forme :

$$i_p = At + B \quad , \quad i_p(t) = \frac{E}{R} \quad (\text{II.13})$$

La solution générale est donc :

$$i_t(t) = i_p(t) + i(t) \quad , \quad i_t(t) = K \times e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{E}{R} \quad (\text{II.14})$$

On a donc la solution totale de la forme :

$$i(t) = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) - I_m \times e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{II.15})$$

La solution totale de cette équation est la somme de deux termes : la solution générale sans second membre Solution générale sans second membre (SSM) et une solution particulière.

La solution SSM : est identique au premier cas, on a donc :

$$i(t) = K \times e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{II.16})$$

La solution particulière, on trouve le terme :

$$i(t) = -\frac{E}{R} \quad (\text{II.17})$$

On obtient la solution totale de l'équation en écrivant :

$$i_t(t) = i_p(t) + i_i(t) \quad (\text{II.18})$$

Ce qui donne :

$$i_t(t) = K \times e^{(-\frac{t}{\tau})} \times \left(-\frac{E}{R}\right) \quad (\text{II.19})$$

Sous les conditions suivantes :

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{T}{2} \\ i_t\left(\frac{T}{2}\right) &= I_m \\ K &= I_m + \frac{E}{R} \end{aligned}$$

Ainsi, la solution totale dans ce cas s'écrit comme ceci :

$$i(t) = \frac{E}{R} \left(-1 + e^{-\frac{t-T/2}{\tau}}\right) + I_m e^{-\frac{t-T/2}{\tau}} \quad (\text{II.20})$$

La modélisation permet de comprendre le fonctionnement de l'onduleur et de prédire ses performances, et peut fournir des résultats tels que la forme d'onde de la tension de sortie, la valeur moyenne de la tension de sortie, le taux d'harmoniques et l'efficacité de l'onduleur.

## Conclusion

Ce chapitre a permis de comprendre les aspects cruciaux de la modélisation et de la gestion des convertisseurs de puissance, avec une attention particulière portée sur les générateurs photovoltaïques (GPV), Les convertisseurs abaisseurs (buck) et éleveurs (boost ), ainsi que les onduleurs et Modulation de largeur d'impulsion (MLI).

La modélisation des GPV a été abordée pour optimiser leur rendement énergétique, soulignant l'importance de techniques précises et adaptées pour maximiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques.

Les convertisseurs abaisseurs (buck) et éleveurs (boost) ont été étudiés en profondeur, en mettant en avant leurs rôles respectifs dans la réduction et l'augmentation de la tension d'entrée. Une analyse détaillée des cycles de commutation et des composants essentiels a permis de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents et les facteurs influençant leurs performances.

la modulation de largeur d'impulsion (MLI) a été présentée comme une méthode indispensable pour améliorer la qualité et l'efficacité des signaux de sortie des onduleurs.

La maîtrise des GPV, des convertisseurs buck et boost, des onduleurs et de la MLI est cruciale pour les ingénieurs et chercheurs travaillant dans le domaine de l'électronique de puissance et des énergies renouvelables.

## Chapitre III:

# Installation PV dans site isolé/connecté au réseau

## Introduction

Dans ce chapitre nous étudions et mettons en œuvre des installations PV dans les sites isolés et sites connectés au réseau électrique qui présente de nombreux avantages, notamment l'accès à l'électricité, la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles, la stabilité du réseau, les économies financières et le développement socio-économique. Nous appliquerons cette étude en nous basant sur logiciel HOMER Pro. Grâce à ce dernier, nous pouvons réaliser une étude comparative entre trois sites différents au regard de la production d'énergie et de plusieurs facteurs qui contribuent à déterminer quels sites sont meilleurs que les autres en termes d'installation PV.

### III.1 Etude analytique de l'installation PV

Une étude analytique de l'installation photovoltaïque PV implique généralement une analyse approfondie de plusieurs aspects techniques, économiques et environnementaux de l'installation. Cette étude se base souvent sur des simulations plutôt que sur des études réalistes, en raison des difficultés liées à la comparaison directe entre deux installations solaires situées dans des sites différents, mais ayant des données similaires telles que la capacité de génération et le nombre d'installations solaires.

L'utilisation d'un logiciel de simulation tel que Homer Pro permet de définir et de contrôler différentes variables et données pour les installations photovoltaïques. Il est également possible d'utiliser des données météorologiques téléchargées pour effectuer une comparaison entre les résultats obtenus pour deux sites différents.

L'analyse technique d'une installation photovoltaïque comprend généralement la modélisation du système, la simulation de la production d'énergie en fonction des conditions météorologiques et de divers paramètres, tels que l'inclinaison des panneaux solaires, leur orientation, l'efficacité des onduleurs, etc. Ces simulations permettent de prédire la production d'énergie attendue et d'évaluer le rendement du système dans différentes conditions. L'analyse économique d'une installation photo-voltaïque implique l'évaluation des coûts d'investissement, des coûts d'exploitation et de maintenance, ainsi que des revenus générés par la vente d'électricité produite. Des indicateurs financiers tels que le temps de retour sur investissement, la valeur actuelle nette et le taux de rendement interne sont souvent utilisés pour évaluer la viabilité économique du projet.

L'analyse environnementale prend en compte les émissions de gaz à effet de serre évitées grâce à l'utilisation de l'énergie solaire, ainsi que d'autres impacts environnementaux tels que la consommation d'eau, la production de déchets et l'utilisation des ressources naturelles. Des méthodes d'évaluation telles que l'analyse du cycle de vie peuvent être utilisées pour quantifier ces impacts et comparer l'installation photovoltaïque à d'autres sources d'énergie.

## III.2 Présentation du Logiciel HOMER Pro

Hybrid Optimisation Model For Electric Renewables en anglais (HOMER) est un logiciel de simulation conçu pour modéliser et optimiser la performance des systèmes énergétiques renouvelables et hybrides. Il évalue la faisabilité technique et économique de différentes configurations de systèmes énergétiques sur une année entière, en simulant le fonctionnement du système pour 8760 heures (chaque heure de l'année)[45]. La première version a été développée en 1992 pour US National Renewable Energy Laboratory en anglais (NREL) par Dr. Peter Lilienthal, le développeur original du logiciel HOMER Pro[46].

### III.2.1 Définition

Homer est un modèle d'optimisation des systèmes hybrides fonctionnant avec les énergies renouvelables. Ce logiciel est un outil puissant pour la conception et l'analyse des systèmes de production d'électricité hybrides, composés de groupes électrogènes, de système de cogénération, d'éolienne, de système photovoltaïque, de système hydraulique, de batteries, de piles à combustible, de la Biomasse et bien d'autres. Que l'installation soit reliée au réseau ou non, cet logiciel permet de déterminer comment les sources d'énergies intermittentes comme l'éolien et solaire peuvent être intégrées de manière optimale au sein des systèmes hybrides..

### III.2.2 Méthode générale d'utilisation HOMER Pro

Le logiciel HOMER Pro est facile à utiliser et son interface est similaire aux logiciels usuels (Voir figure III.1). On peut considérer que l'interface d'HOMER a trois parties importantes : La première est la définition de système, la deuxième présente les ressources et la troisième donne résultats. Aussi, le logiciel nous indique les étapes que nous devons suivre pour la définition

du système. La première étape permet de choisir le nom du projet et la localisation du site de projet dans la fenêtre de (DESIGN) indiqué dans la figure III.1.

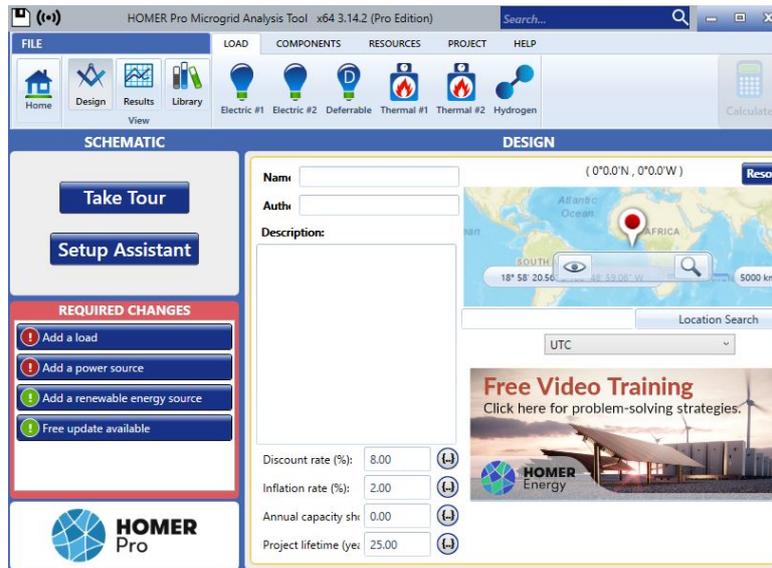


Figure III.1 l'interface de logiciel HOMER Pro..

La partie de définition du système permet de choisir les équipements qui seront inclus dans le système à modéliser. Il suffit de cocher les éléments à utiliser selon plusieurs choix illustrés à la Figure III.2. De plus, à cette étape, vous avez le choix : modéliser le réseau électrique, le comparer à un système hors réseau, ou simplement ne pas modéliser le réseau.



Figure III.2 les équipements.

Une fois sélectionnés, les divers équipements apparaissent dans la partie 1 de définition du système (schéma de système) comme à la Figure III.3, et les ressources nécessaires aux équipements sélectionnés apparaissent, elles dans la partie 2 de définition des ressources comme à la Figure III.4.



Figure III.3 Fenêtre pour faire schéma de système.

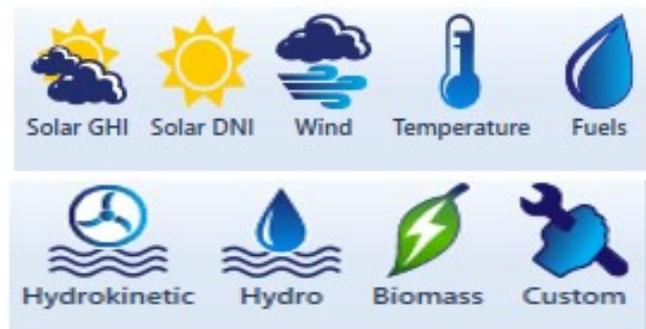


Figure III.4 Ressources nécessaires .

### III.2.3 Méthodologies spécifiques aux simulations

Une démarche pour le dimensionnement est définie conjointement avec une démarche pour les simulations sur HOMER pour les systèmes. La démarche générale pour le dimensionnement et les simulations est résumée en quelques étapes :

- 1- Évaluation de la demande énergétique (consommation d'énergie) ;
- 2- Prédimensionnement à la main des équipements ;
- 3- Identifier les équipements nécessaires au système (panneaux solaires, convertisseur, batteries) dans le logiciel HOMER ;
- 4- Entrer les données nécessaires dans le logiciel :
  - a. de consommation énergétique ;
  - b. de gisement solaire pour le lieu désiré ;
  - c. pour les équipements (prix des équipements et coût d'opération et d'entretien) ;
- 5- Lancer le calcul dans HOMER ;
- 6- Optimiser les résultats du logiciel HOMER de façon itérative pour arriver à la solution optimale pour ce système ;
- 7- Faire des analyses de sensibilité, si nécessaire ;
- 8- Valider le système.



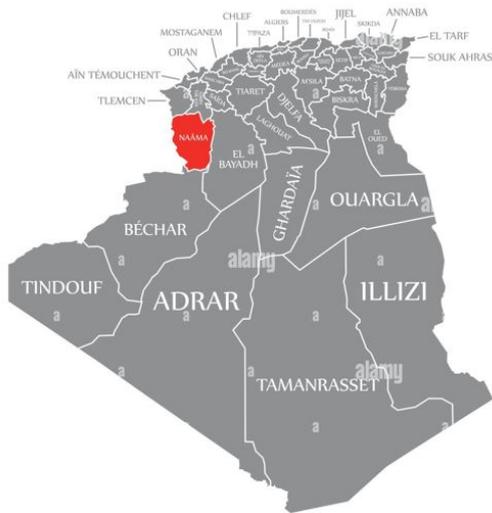


Figure III.7 Localisation de site de Mecheria sur la carte d'Algérie[15].



Figure III.8 Coordonnées géographiques du site Mecheria .

### III.3.1.2 Site de Mecheria

Mecheria est une ville située dans la wilaya de Naâma, dans le nord-ouest de l'Algérie. Elle se trouve à environ 30 kilomètres de Naâma, la capitale du pays. Mecheria est une zone désertique caractérisée par ses formations rocheuses remarquables et ses paysages uniques. Le climat de Mecheria est subtropical aride, avec des hivers doux (s'il y a des périodes de froid) et des étés chauds et ensoleillés. En hiver, il peut y avoir des neiges et du gel. Le positionnement du site de travail sur la carte géographique avec des données géographiques :

- Latitude : 33°32'6" Nord
- Longitude : 0°16'5" Ouest

### III.3.1.3 Site d'Adrar

La wilaya d'Adrar se trouve dans le sud-ouest de l'Algérie et est principalement constituée de déserts, en particulier le désert du Sahara. Le climat d'Adrar est désertique chaud, avec des étés très chauds et des hivers doux. Il y a peu de précipitations et les températures estivales peuvent atteindre plus de 45°C.

Le positionnement du site de travail sur la carte géographique avec des données géographiques sont illustrés pour les figures III.9 et III.10 :

- Latitude : 27°53'2.22" Nord
- Longitude : 0°16'7" Ouest

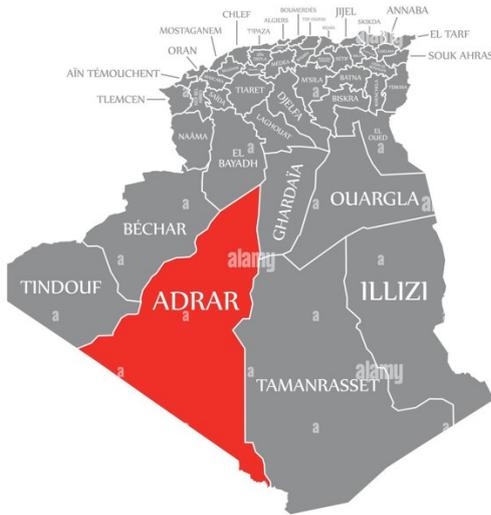


Figure III.9 Localisation de site Adrar sur la carte d’Algérie[16].



Figure III.10 Coordonnées géographiques du site Adrar .

### III.3.2 Ressources nécessaires dans les trois régions

#### III.3.2.1 Température

Lors de l’installation de panneaux solaires photovoltaïques, il est essentiel de prendre en considération la température du site. Cela offre la possibilité d’évaluer de manière précise les performances attendues des panneaux solaires, d’assurer leur longévité et de planifier l’installation de manière optimale afin d’optimiser leur efficacité énergétique. les données représentées dans les figures IV.16,IV.17 et IV.18 montrent la température dans les trois zones dans lesquelles nous étudions l’installation de panneaux solaires.



Figure III.11 Température dans site Tlemcen.



Figure III.12 Température dans site Mecheria .



Figure III.13 Température dans site Adrar .

La température moyenne dans la région de Tlemcen atteint 26,39 °C au mois d’août, 27°C dans la région de Mecheria en juillet et 37,51°C dans la région de l’Adrar en juillet. Cette

dernière région (Adrar) est considérée comme la plus chaude d'entre elles car elle est située dans le désert le plus éloigné d'Algérie.

Le tableau III.1 présente les températures de trois sites:

Mois	Température Moyenne Tlemcen (°C)	Température Moyenne Mecheria (°C)	Température Moyenne Adrar (°C)
Janvier	7.490	5.500	12.160
Février	8.710	7.070	15.310
Mars	11.330	10.180	19.880
Avril	13.620	12.990	24.780
Mai	17.450	17.390	29.600
Juin	22.320	22.800	34.940
Juillet	26.270	27.000	37.510
Août	26.390	26.750	36.690
Septembre	21.850	21.620	32.880
Octobre	17.220	16.230	26.480
Novembre	11.770	10.170	18.920
Décembre	8.630	6.640	13.560

Tableau III.1 Températures moyennes pour Tlemcen, Mecheria et Adrar.

### III.3.2.2 Irradiation solaire

L'étape essentielle dans la conception d'un système photovoltaïque est la détermination de sa taille optimale qui dépend principalement des données climatiques du site.

Les figures III.14, III.15 et III.16 représentent les changements de rayonnement solaire pour chaque région de Tlemcen, Mecheria et Adrar, Respectivement.

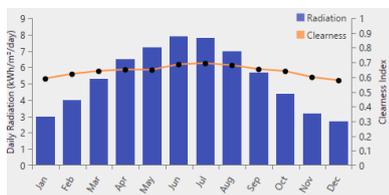


Figure III.14 Irradiation dans site Tlemcen.

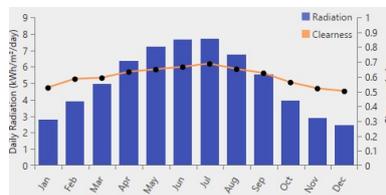


Figure III.15 Irradiation dans site Mecheria.



Figure III.16 Irradiation dans site Adrar.

La valeur la plus élevée à Tlemcen est de 7,9 (KWh/m2/jour) en juin, la valeur la plus élevée dans la région de Mecheria est de 7,72 (KWh/m2/jour) en juillet et la valeur la plus élevée dans la région de l'Adrar est de 7,82 KWh/m2 en juillet. Dans le cadre de notre étude, nous prenons en compte les niveaux de rayonnement solaire les plus bas afin de garantir une disponibilité

continue de l'énergie électrique à partir de panneaux solaires tout au long de l'année. Ainsi, les régions de Tlemcen, Mecheria et Adrar se distinguent par leurs faibles valeurs de rayonnement solaire, respectivement 2,7 (KWh/m<sup>2</sup>/jour), 2,46 (KWh/m<sup>2</sup>/jour) et 3,3 (KWh/m<sup>2</sup>/jour).

Mois	Tlemcen		Mecheria		Adrar	
	Irradiation (KWh/m <sup>2</sup> /jour)	Indice de clarté	Irradiation (KWh/m <sup>2</sup> /jour)	Indice de clarté	Irradiation (KWh/m <sup>2</sup> /jour)	Indice de clarté
Janvier	3.000	0.588	2.790	0.523	3.740	0.597
Février	4.000	0.619	3.880	0.583	4.870	0.652
Mars	5.300	0.639	4.980	0.590	6.140	0.681
Avril	6.500	0.649	6.360	0.631	7.140	0.690
Mai	7.200	0.647	7.200	0.647	7.580	0.683
Juin	7.900	0.685	7.640	0.664	7.590	0.669
Juillet	7.800	0.692	7.720	0.685	7.820	0.700
Août	7.000	0.679	6.730	0.649	7.260	0.690
Septembre	5.700	0.652	5.520	0.622	6.320	0.676
Octobre	4.400	0.639	3.960	0.560	4.770	0.610
Novembre	3.200	0.598	2.890	0.519	3.900	0.602
Décembre	2.700	0.576	2.460	0.500	3.360	0.572

Tableau III.2 *Irradiation solaire et indice de clarté pour Tlemcen, Mecheria et Adrar.*

### III.3.3 Schéma de conception d'un système PV

La configuration d'un système photovoltaïque branché au réseau électrique ou à d'autres sources d'énergie dépend en grande partie de la disponibilité de la ressource énergétique solaire, varient selon la localisation géographique, les conditions météorologiques, l'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires, ainsi que d'autres facteurs. Les simulations horaires permettent d'analyser ces variables et d'optimiser la conception du système en fonction des besoins énergétiques spécifiques, des contraintes techniques et des objectifs financiers.

Les deux figures ci-dessous montrent le système global. Il comprend des panneaux solaires, des convertisseurs, des batteries, des charges et générateur diesel pour les installations dans sites isolées

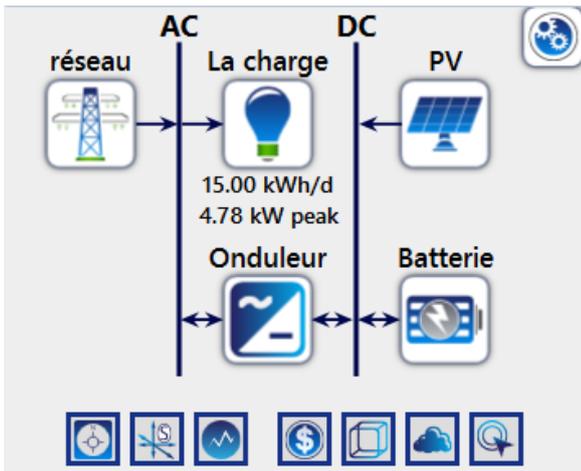


Figure III.17 Schéma de l'installation PV avec stockage (site connecté au réseau).

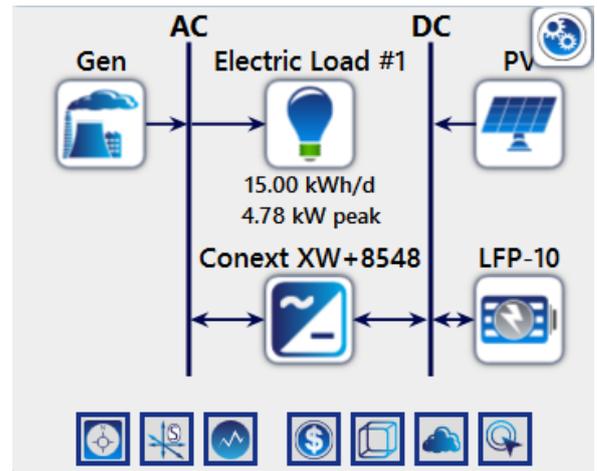


Figure III.18 Schéma de l'installation PV avec stockage (site isolé).

### III.4 Dimensionnement d'installation PV pour les deux cas (Système isolé/connecté au réseau)

#### III.4.1 Estimation de la consommation (charge utilisé)

Dans notre étude, nous avons choisi une charge qui est une maison à consommation moyenne et qui contient les appareils électroménagers nécessaires au propriétaire.

Le tableau ci-dessous présente les appareils utilisés :

Appareil	Puissance (W)	Temps de fonctionnement (h/jour)	Consommation journalière (Wh)
Éclairage LED (10 W x 10)	100	10	1000
Climatiseur	2100	3	6300
Réfrigérateur	200	24	4800
Téléviseur LED	100	4	400
Ordinateur portable	50	2	100
Four électrique	2000	1	2000
Console de jeux	200	2	400
<b>Total</b>			<b>15000</b>

Tableau III.3 Consommation journalière de différents appareils.

- consommation journalière moyenne : 15 kWh
- puissance maximale : 4,75 kW
- consommation annuelle : 5475KWh

### III.4.2 Choix des panneaux solaires

#### III.4.2.1 Détermination de La puissance crête d'un système PV

La puissance crête d'un système PV, mesurée en kilowatts-crête (kWc), représente son rendement optimal sous des conditions d'ensoleillement idéales (Standard Test Conditions - STC). Ce paramètre est essentiel pour évaluer la capacité de production du système et le dimensionner en comparaison avec d'autres installations similaires [47].

$$P_c = \frac{E_c \cdot P_i}{G_i \cdot P_r} \quad (\text{III.1})$$

$E_c$  : Énergie consommée

$P_r$  : Ratio de performance (Ce facteur prend en compte les pertes et l'efficacité du système, qui est d'environ 70 % à 85 %)

$P_i$  : Irradiation solaire sous conditions Standard Test Conditions (STC) .

$G_i$  : Irradiation solaire du mois le plus défavorable.

On utilise la relation (18) pour calculer la puissance nécessaire de système PV dans trois régions différentes (Tlemcen, Mecheria et Adrar).

a. Pour le site de Tlemcen, l'irradiation solaire la plus basse est de 2.7 kWh/m<sup>2</sup> par jour en décembre.

$G_i = 2.7 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$  ;  $E_c = 15 \text{ kWh}$  ;  $P_r = 0.80$  ;  $P_i = 1$

$$P_c = \frac{15 \times 1}{2.7 \times 0.8} = 6.94 \text{ kWc} \quad (\text{III.2})$$

b. Pour le site de Mecheria, l'irradiation solaire la plus basse est de 2.46 kWh/m<sup>2</sup> par jour en décembre.  $G_i = 2.46 \text{ kWh}$  ;  $E_c = 15 \text{ kWh}$  ;  $P_r = 0.80$  ;  $P_i = 1$ .

$$P_c = \frac{15 \times 1}{2.46 \times 0.8} = 7.62 \text{ kWc} \quad (\text{III.3})$$

c. Pour le site d'Adrar, l'irradiation solaire la plus basse est de  $3.3 \text{ kWh/m}^2$  par jour en décembre.

$G_i = 3.3 \text{ kWh}$  ;  $E_c = 15 \text{ kWh}$  ;  $P_r = 0.80$  ;  $P_i = 1$ .

$$P_c = \frac{15 \times 1}{3.3 \times 0.8} = 5.68 \text{ kWc} \quad (\text{III.4})$$

Les panneaux utilisés dans notre étude se caractérisent par les spécifications suivantes :

Paramètre	Valeur
Puissance Maximal (Pmax)	330 W
Tension à Puissance Maximal (Vmax)	37.4 V
Courant à Puissance Maximum (Imax)	8.83 A
Tension Circuit Ouvert (Voc)	45.8 V
Courant Circuit Court (Isc)	9.46 A
Dimensions (L/W/H)	1956 mm / 992 mm / 44 mm

Tableau III.4 *Caractéristiques techniques [18].*

### III.4.2.2 Calcul du nombre de panneaux

Pour calculer le nombre de panneaux nécessaires, on applique la relation suivante [47]:

$$N_{\text{panneaux}} = \frac{P_c}{P_{\text{max}}} \quad (\text{III.5})$$

Où :

- $P_c$  : la puissance crête du panneau photovoltaïque, exprimée dans la relation (1).
- $P_{\text{max}}$  : la puissance maximale du panneau.

Pour calculer le nombre de panneaux en série, on applique la relation suivante [47]:

$$N_s = \frac{U_{\text{ond}}}{U_{\text{mod}}} \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$U_{\text{ond}}$  : Tension de l'onduleur.

$U_{\text{mod}}$  : Tension aux bornes d'un module.

Pour calculer le nombre de panneaux en parallèle, on applique la relation suivante [47] :

$$N_p = \frac{N_{\text{panneaux}}}{N_s} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

- $N_{\text{panneaux}}$  : Nombre de panneaux.
- $N_s$  : Nombre de panneaux en série.
- $N_p$  : Nombre de panneaux en parallèle.

Dans ce tableau III.5, nous avons résumé nombre de panneaux solaire dans chaque site.

Site	Ns	Np	Npanneaux
Tlemcen	7	3	21
Mecheria	8	3	24
Adrar	9	2	18

Tableau III.5 *Nombre de panneaux solaires* .

Pour chaque site, la configuration a été choisie de manière à respecter les caractéristiques de l'onduleur, à savoir un courant maximal de 26 A et une tension minimale de 120 V .

### III.4.2.3 Calcul de la surface occupée par les panneaux

Pour calculer la surface occupée par des panneaux solaires, on utilise généralement la relation suivante [47]:

$$S_T = S_U \times N_{\text{panneaux}} \quad (\text{III.8})$$

Avec :

- $S_T$  : Surface totale.
- $S_U$  : Surface unitaire d'un panneau.

- $N_{\text{panneaux}}$  : Nombre de panneaux.

Application numérique pour les 3 régions :

- Tlemcen :  $S_T = 1.956 \times 0.992 \times 21 = 40.94 \text{ m}^2$
- Mecheria :  $S_T = 1.956 \times 0.992 \times 24 = 46.56 \text{ m}^2$
- Adrar :  $S_T = 1.956 \times 0.992 \times 18 = 34.93 \text{ m}^2$

### III.4.3 Choix du Générateur Diesel

Pour palier à la consommation énergétique nous avons besoin d'un générateur diesel, ou groupe électrogène diesel, est un appareil qui génère de l'électricité à partir d'un moteur diesel comme alimentateur. Il est principalement employé dans les cas de besoin d'une alimentation électrique fiable, que ce soit en cas de coupures de courant, dans des régions éloignées ou sur des chantiers de construction.

Dans les régions où le rayonnement solaire est intermittent ou où les conditions météorologiques peuvent restreindre la production d'énergie solaire, il est envisageable d'utiliser un générateur diesel pour garantir une production d'électricité continue. Il est crucial dans les secteurs industriels et commerciaux où une interruption de l'électricité peut engendrer des pertes financières considérables.

#### Caractéristiques du Générateur Diesel

Le tableau III.6 expose les caractéristiques particulières du carburant diesel employé. Il est crucial de disposer de ces données afin d'évaluer son efficacité et son impact sur l'environnement dans différents contextes d'utilisation.

Caractéristique	Valeur
Carburant	Diesel
Puissance nominale (kW)	10
Interception de la courbe de carburant (L/h)	0.480
Pente de la courbe de carburant (L/h/kW)	0.286
Émissions CO (g/L de carburant)	19.76
Émissions HC non brûlés (g/L de carburant)	0.72
Particules (g/L de carburant)	1.198
Soufre du carburant par rapport aux PM (%)	2.2
NOx (g/L de carburant)	22.46
Pouvoir calorifique inférieur (MJ/kg)	43.2
Densité (kg/m <sup>3</sup> )	820
Teneur en carbone (%)	88
Teneur en soufre (%)	0.4

Tableau III.6 *Caractéristiques du générateur Diesel.*

#### III.4.4 Choix de l'Onduleur

L'onduleur convertit le courant continu produit par les panneaux en courant alternatif identique à celui du réseau. Il est donc indispensable pour l'alimentation des charges à courant alternatif. Le choix de l'onduleur dépend des caractéristiques électriques des panneaux et de la charge alimentée (puissance, tension).

La puissance d'entrée maximale de ce type d'onduleur doit être compatible avec la puissance maximale du champ PV [47].

$$0.8 \times P_c \leq P_{\text{ond}} \leq 1.2 \times P_c \quad (\text{III.9})$$

Site	P <sub>c</sub> (kW)	1.2 × P <sub>c</sub> (kW)	0.8 × P <sub>c</sub> (kW)
Tlemcen	6.94	8.328	5.552
Mecheria	7.62	9.144	6.096
Adrar	5.68	6.816	4.544

Tableau III.7 *Puissances pour les différents sites.*

Pour le besoin de notre étude, le convertisseur choisit est présenté dans le tableau suivant :

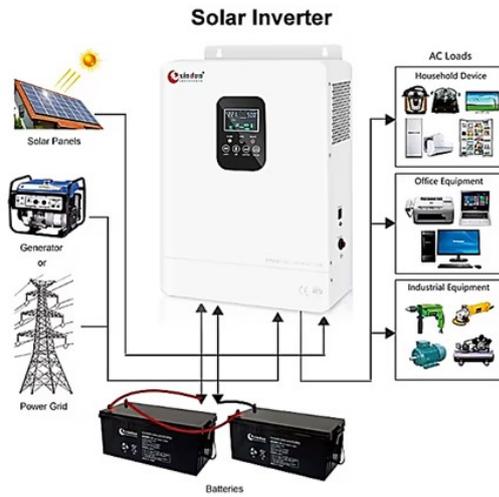


Figure III.19 Onduleur hybride.

Caractéristique	Valeur
Tension CC d'entrée	360 V
Tension CC d'entrée minimal	120 V
Courant continu d'entrée maximal	26 A
Fréquence de sortie	50/60 Hz
Puissance de sortie	5000 W
Tension DC minimum	30 - 60 V 120 V
Puissance DC Maximum	8000 W
Courant AC maximum	25 A
Tension nominale de batterie	48 V

Figure III.20 Caractéristiques de l'onduleur[17].

### III.4.5 Choix des batteries

Chaque ensemble de batteries se distingue par sa capacité (exprimée en Ah) et sa tension (mesurée en V). Habituellement, la sélection de la tension du parc de batteries est déterminée en fonction de la puissance nominale (PN) des charges, selon les critères suivants [47] :

$$\text{Tension de batterie} = \begin{cases} 12 \text{ V} & \text{si } PN \leq 500 \text{ W}, \\ 24 \text{ V} & \text{si } 500 \text{ W} < PN \leq 2000 \text{ W}, \\ 48 \text{ V} & \text{si } PN > 2000 \text{ W}. \end{cases}$$

Dans notre cas, nous avons opté pour une batterie ayant une tension de 48V, car la puissance nominale de notre étude dépasse les 2000 W. En fonction des données météorologiques de chaque site, nous supposons que l'autonomie des batteries est de deux jours pour Adrar, de trois jours pour Tlemcen et de quatre jours pour Mecheria.

### III.4.5.1 Calcul du nombre de batteries

Pour calculer le nombre de batteries nécessaires, on applique la relation suivante [47]:

$$Nb = \frac{Nj \times Ec}{E_{\text{utilisable}}} \quad (\text{III.10})$$

Où :

- $Nb$  : nombre des batteries nécessaires.
- $Nj$  : nombre de jours autonomie.
- $Ec$  : énergie moyenne consommée par jour.

La relation suivante est utilisée pour obtenir l'énergie utilisable dans la batterie :

$$E_{\text{utilisable}} = E_{\text{batterie}} \times DOD \times \eta \quad (\text{III.11})$$

Où :  $DOD$  : profondeur de décharge (0.80) ;  $\eta$  : rendement de batterie (0.98) L'énergie utilisable de la batterie est représentée par la relation III.11:

$$E_{\text{utilisable}} = 9.6 \times 0.8 \times 0.98 = 7.52 \text{ kWh}$$

Site	Autonomie (jours)	Nombre de batteries
Tlemcen	3	6
Mecheria	4	8
Adrar	2	4

Tableau III.8 *Nombre de batteries nécessaires pour chaque site.*

### III.4.6 Sélection des câbles pour une installation photovoltaïque

Le choix des câbles pour une installation photovoltaïque nécessite une attention particulière aux caractéristiques électriques et environnementales. Une bonne sélection garantit non seulement la performance optimale du système mais aussi sa sécurité et sa durabilité. Formules pour le calcul des câbles et des batterie.

**III.4.6.1 Calcul du courant maximal du système PV**

$$I = N_p \times I_m \quad (\text{III.12})$$

où :

- $N_p$  est le nombre de batteries en parallèle.
- $I_m$  est le courant maximal d'une seule batterie.

**III.4.6.2 Calcul de la résistance du câble:**

$$R = \frac{\Delta U}{I} \quad (\text{III.13})$$

Avec :  $R$  : résistance du câble.;  $\Delta U$  : chute de tension.;  $I$  : courant.

**III.4.6.3 Calcul de la section du câble:**

$$S = \frac{\rho \cdot 2L}{R} \quad (\text{III.14})$$

Où :

- $S$  : section du câble.
- $L$  : longueur du câble.
- $\rho$  : résistivité de cuivre.
- $R$  : résistance du câble.

**III.4.6.4 Calcul du courant maximal de la batterie:**

$$I_{\max \text{ batteries}} = \frac{P_{\max \text{ onduleur}}}{U_{\text{batterie}}} \quad (\text{III.15})$$

Où :

- $I_{\max \text{ batteries}}$  : courant maximal de la batterie.

- $P_{\text{max onduleur}}$  : puissance maximale de l'onduleur.
- $U_{\text{batterie}}$  : tension de la batterie.

La formule (32) employée afin de déterminer le courant maximal de la batterie

#### III.4.6.5 Détermination la section de cable entre le boîtier de raccordement et l'onduleur:

Le tableau III.9 présente les section normalisée des conducteurs électriques entre le boîtier de raccordement et l'onduleur pour les trois sites: Tlemcen, Mecheria, et Adrar.

Site	L (m)	Pc (W)	I (A)	$\Delta U$ (V)	R ( $\Omega$ )	Section normalisée (mm <sup>2</sup> )
Tlemcen	10	6940	26.49	5.23	0.19	2.5
Mecheria	15	7620	26.49	5.98	0.22	2.5
Adrar	20	5680	17.66	6.73	0.38	2.5

Tableau III.9 *Section de cable entre le boîtier de raccordement et l'onduleur.*

D'après ces résultats, bien que les conditions et les besoins varient légèrement entre les sites, une approche standardisée avec une section de conducteur normalisée de 2.5 mm<sup>2</sup> est suffisante pour garantir une performance adéquate et fiable du système électrique dans chacun des trois sites analysés. Cette approche garantit une chute de tension acceptable et une résistance appropriée, assurant ainsi l'efficacité et la sécurité du système d'alimentation électrique solaire.

#### III.4.6.6 Déterminer la section de cable entre le parc batterie et l'onduleur

Le tableau III.10 présente les section normalisée des conducteurs électriques entre le parc batterie et l'onduleur pour les trois sites: Tlemcen, Mecheria, et Adrar.

Site	L (m)	$I_{\max}$ batteries (A)	R ( $\Omega$ )	$\Delta U$ (V)	Section normalisée (mm <sup>2</sup> )
Tlemcen	3 m	166.6	0.0055	0.92	25
Mecheria	3 m	166.6	0.0055	0.92	25
Adrar	3 m	166.6	0.0055	0.92	25

Tableau III.10 Section de câble entre le parc batterie et l'onduleur pour les trois sites.

L'adoption d'une section normalisée de 25 mm<sup>2</sup> pour tous les sites permet de simplifier l'installation et d'assurer une robustesse accrue, même si la section calculée est légèrement inférieure.

### III.4.6.7 Détermination de la section de câble entre l'onduleur et le disjoncteur de maison (L=4m)

Lorsque celui-ci débite sa puissance nominale :

$$I_{\max} = \frac{P_{\max \text{ charge}}}{U} = \frac{4750}{220} = 21,59 \text{ A}$$

$$R_{\max} \text{ de la ligne } R = \frac{\Delta U}{I} = \frac{4.4}{21,59} = 0,20 \Omega$$

$$S = \frac{\rho \cdot 2L}{R} = \frac{1,6 \times 10^{-8} \times 8}{0,20} = 1,68 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Donc, la section normalisée est de 2.5 mm<sup>2</sup> pour les trois régions.

## Conclusion

Le dimensionnement de systèmes photovoltaïques PV dans des sites isolés et connectés au réseau électrique offrent une solution énergétique durable et rentable. Grâce à une analyse approfondie réalisée à l'aide du logiciel HOMER Pro. Nous avons sélectionné et équilibré les composants principaux – panneaux PV, onduleurs, batteries et câbles – pour assurer la réussite de chaque installation photovoltaïque.

Chapitre IV:  
Résultats et Discussion

## Introduction

L'optimisation des systèmes photovoltaïques PV est essentielle pour maximiser l'efficacité énergétique et la rentabilité des investissements dans les énergies renouvelables. Cette étude a pour but de comparer les performances des installations photo voltaïques dans trois régions distinctes de l'Algérie : Tlemcen, Mecheria, et Adrar. En utilisant le logiciel HOMER Pro, nous visons à déterminer le site le plus approprié pour une installation PV en fonction de divers critères tels que la production d'énergie, le coût et l'impact environnemental.

### IV.1 Résultats de la simulation pour installation de système PV dans site isolé

#### IV.1.1 Pour site Tlemcen

La figure IV.1 illustre la variation annuelle de la production d'énergie photovoltaïque à Tlemcen pour un système isolé.

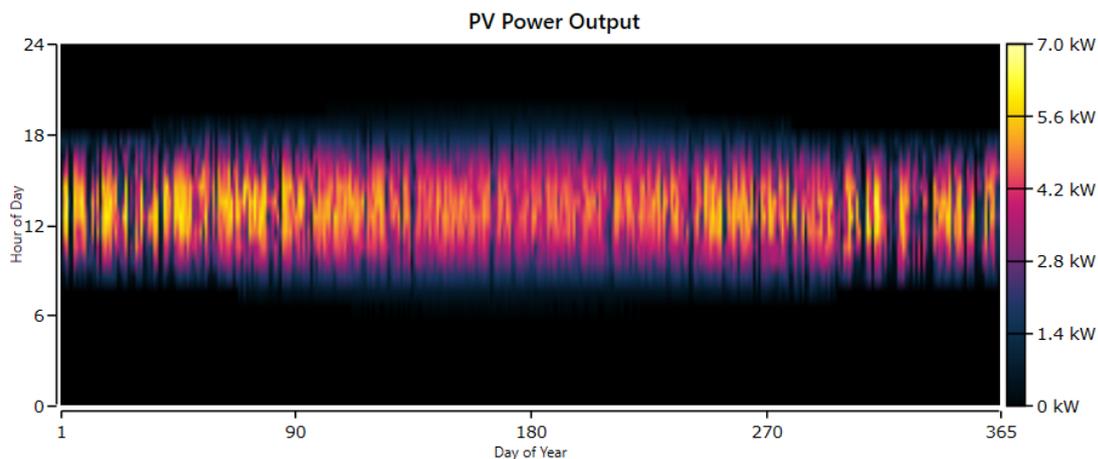


Figure IV.1 *Variation annuelle de la production d'énergie photovoltaïque à Tlemcen pour un système isolé.*

On observe que la production PV est la plus élevée autour de midi, ce qui est attendu car c'est le moment où le soleil est le plus haut dans le ciel.

Il y a une variation saisonnière notable dans la production d'énergie. La production est plus élevée en été (jours 150 à 250) comparée à l'hiver. Cela est dû à l'angle d'incidence du soleil et à la durée du jour plus longue en été. Les périodes avec une production minimale se situent

vers le début et la fin de l'année, ce qui correspond aux mois d'hiver où les jours sont plus courts et l'ensoleillement moins intense.

Les périodes où la couleur jaune est la plus visible indiquent les moments de production maximale, probablement durant les mois d'été en milieu de journée.

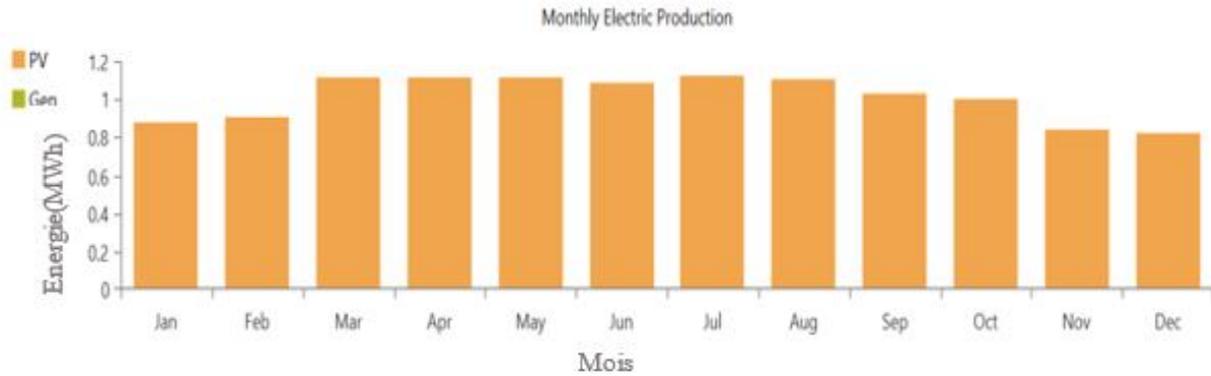


Figure IV.2 *Production mensuelle dans site de Tlemcen (Site isolé).*

Le graphique ci-dessus montre la production mensuelle d'électricité d'un système photovoltaïque PV à Tlemcen.

La production PV est assez constante tout au long de l'année, avec une légère augmentation durant les mois de printemps et d'été (mars à septembre), atteignant environ 1,2 kWh.

Les mois d'hiver (novembre à février) montrent une légère baisse de production, autour de 0,8 kWh.

Le vert est mentionné dans la légende pour la production d'un générateur (Gen), mais il n'y a pas de barre verte visible dans le graphique. Cela pourrait signifier que le générateur n'a pas été utilisé ou que sa production est négligeable par rapport aux panneaux photovoltaïques.

#### IV.1.2 Pour site Mecheria

Dans la figure IV.3, Nous avons représenté la production d'énergie d'un système PV à Mecheria, présentée sous forme d'une carte de chaleur (heatmap) sur une année.

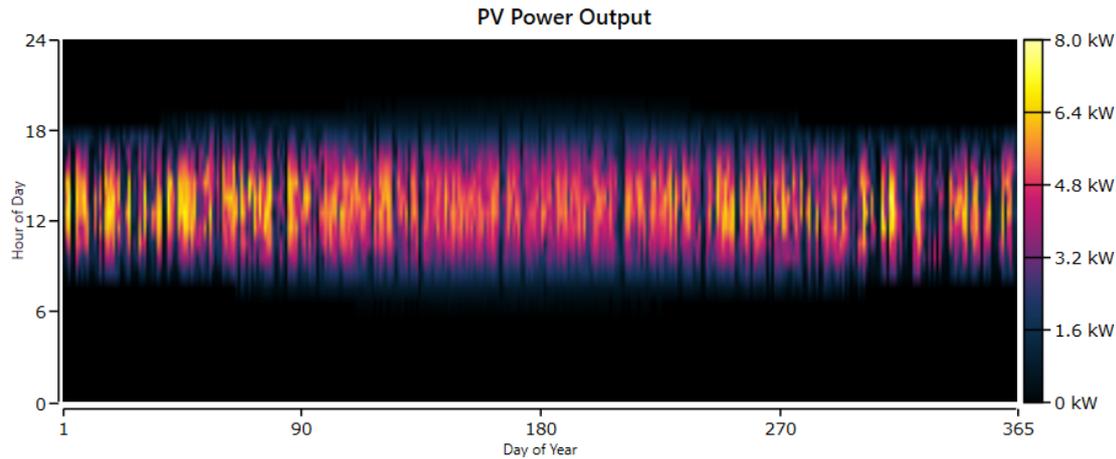


Figure IV.3 *Production d'énergie PV à Mecheria sur une année.*

La production d'énergie PV est concentrée entre environ 6 heures et 18 heures, ce qui correspond aux heures de lumière du jour. Elle est plus élevée autour de midi, lorsque le soleil est au plus haut.

Les jours autour du milieu de l'année (environ jour 180) montrent une production d'énergie plus élevée et plus prolongée durant la journée. Cela est dû à une plus grande durée d'ensoleillement et à une position plus élevée du soleil dans le ciel.

Les jours en début et en fin d'année montrent une production plus faible et plus courte. Les jours sont plus courts et le soleil est plus bas dans le ciel.

La production d'énergie fluctue grandement d'un jour à l'autre. Il est possible que cela soit causé par des conditions météorologiques fluctuantes (nuages, pluie, etc.) qui impactent l'ensoleillement.

Mecheria est située en Algérie, une région connue pour avoir un climat désertique avec beaucoup de soleil. La figure IV.3 reflète une forte production d'énergie PV, surtout en été, ce qui est cohérent avec un climat ensoleillé.

Dans figure IV.4, La production électrique est relativement stable tout au long de l'année, avec des variations mineures. Cela indique une bonne performance du système PV malgré les variations saisonnières.

La production est légèrement plus faible en décembre, janvier et février, avec environ 0.8 kWh, en raison des jours plus courts et de l'ensoleillement réduit.

les mois de mai et juin présentent les pics de production les plus élevés, atteignant environ 1.2 kW. Cela correspond à la période de l'année avec le plus d'ensoleillement à Mecheria.

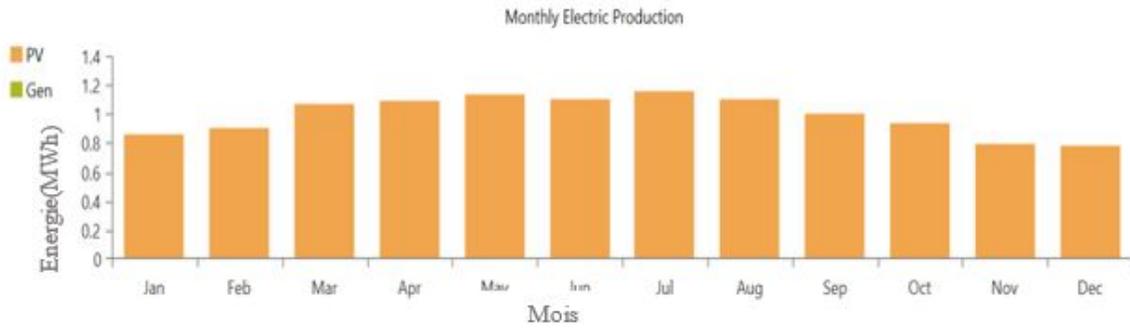


Figure IV.4 Production mensuelle dans site de Mecheria (Site isolé).

Mecheria bénéficie d'un climat ensoleillé, ce qui se reflète dans la production stable et élevée d'énergie photovoltaïque tout au long de l'année.

### IV.1.3 Pour site Adrar

La carte de chaleur présentée dans la figure IV.5 présente la production annuelle d'énergie photovoltaïque (PV) dans un site isolé à Adrar.

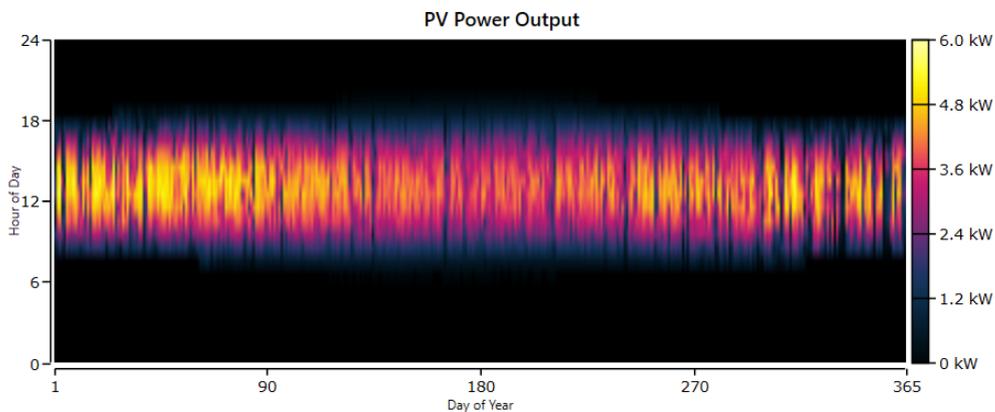


Figure IV.5 Production d'énergie PV à Adrar sur une année.

La production est principalement concentrée entre 6 heures et 18 heures, avec un pic vers midi, ce qui correspond aux heures de lumière disponibles.

En été, la production est la plus élevée (environ 180 jours), avec une durée d'ensoleillement plus longue et une position plus élevée du soleil, tandis que l'hiver est la plus faible, avec des jours plus courts et un soleil plus bas. Les variations quotidiennes, sans doute causées par les conditions météorologiques changeantes, ont un impact sur l'ensoleillement. Située en Algérie, Adrar profite d'un climat désertique ensoleillé, ce qui entraîne une production élevée d'énergie

solaire photovoltaïque, en particulier pendant l'été.

La figure IV.6 représente la production d'énergie dans un site à Adrar, avec une comparaison entre la production par des systèmes photovoltaïques (PV) et un générateur diesel.

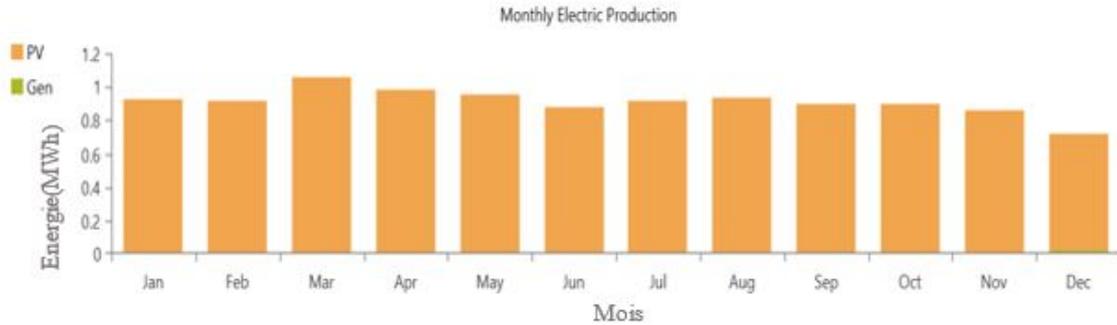


Figure IV.6 Production mensuelle dans site de Adrar (Site isolé).

Nous observons que la production d'énergie par les PV est relativement stable tout au long de l'année, avec de légères variations mensuelles. La production est la plus élevée en mars, avril et mai, et elle est la plus faible en décembre.

En général, la production mensuelle varie entre environ 0,8 MWh et 1,0 MWh.

Le graphique montre que la contribution du générateur diesel est très faible ou nulle tout au long de l'année (voir figure IV.6), Cela indique que le site à Adrar dépend principalement des systèmes PV pour la production d'énergie.

Le site d'Adrar semble être parfaitement adapté à la production d'énergie solaire en évitant grandement les générateurs diesel, mettant en évidence une stratégie d'exploitation efficace des ressources solaires.

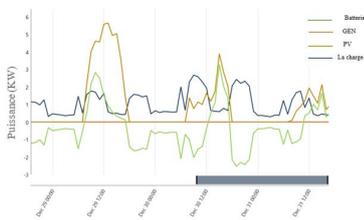


Figure IV.7 Évolution de la puissance dans site Tlemcen.

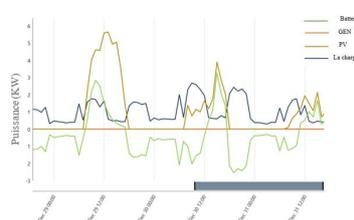


Figure IV.8 Évolution de la puissance dans site Mecheria

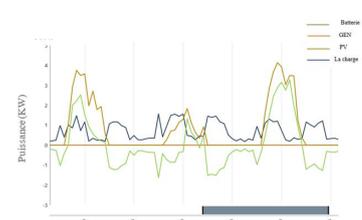


Figure IV.9 Évolution de la puissance dans site Adrar .

- Dans site Tlemcen (voir figure IV.7), Nous constatons des hausses significatives en milieu de journée et des cycles quotidiens avec une production faible ou nulle la nuit. La batterie se charge et se décharge régulièrement pour répondre aux besoins énergétiques, et des pics indiquent l'utilisation du générateur lorsque la production PV est insuffisante ou la batterie déchargée. La demande fluctuante est compensée par la batterie, le PV et le générateur pour maintenir une alimentation stable.
- Le graphique du site de Mecheria (voir figure IV.8) illustre la gestion énergétique combinée de la demande , de la production photovoltaïque PV, de la batterie et du générateur diesel. La courbe de la demande (la charge) montre des fluctuations significatives, avec des pics nécessitant une réponse énergétique. La production PV atteint son maximum en milieu de journée, tandis que la batterie se charge pendant ces périodes et se décharge pour répondre à la demande lorsque la production PV est insuffisante. Le générateur diesel est activé principalement pendant les périodes de haute demande ou lorsque les autres sources ne suffisent pas. Cette gestion intégrée permet de maintenir une alimentation énergétique stable et fiable, maximisant l'utilisation de l'énergie solaire disponible tout en assurant la continuité de l'approvisionnement.
- Nous observons dans la figure IV.9 les performances énergétiques d'un site isolé à Adrar, avec des données sur les batteries, les systèmes photovoltaïques (PV), la charge et le générateur diesel. Nous constatons que les batteries se chargent et se déchargent régulièrement, indiquant leur utilisation active.  
Les systèmes PV produisent de l'énergie principalement pendant la journée, correspondant aux heures d'ensoleillement. La demande énergétique est relativement stable. Le générateur diesel est utilisé pour compenser les insuffisances de production solaire et recharger les batteries lorsque l'ensoleillement est faible.

## IV.2 Résultats de la simulation pour Installation PV connecté au réseau

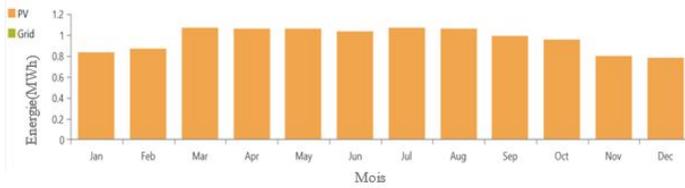


Figure IV.10 Production mensuelle dans site de Tlemcen (connecté au réseau).

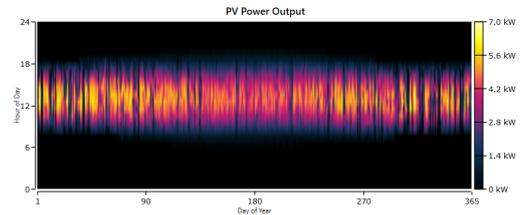


Figure IV.11 Spectrogramme de la production PV à Tlemcen (connecté au réseau).

La figure IV.10 affiche une production moyenne mensuelle dans site de Tlemcen.

Energie photovoltaïque PV variant entre 0.8 MWh en décembre et janvier et 1.1 MWh de mai à août, montrant une tendance saisonnière avec une production maximale pendant les mois d’été.

La carte de chaleur qui représente dans la figure IV.11, illustrant une variation diurne avec des pics de production pendant les heures ensoleillées et une production réduite voire nulle la nuit.

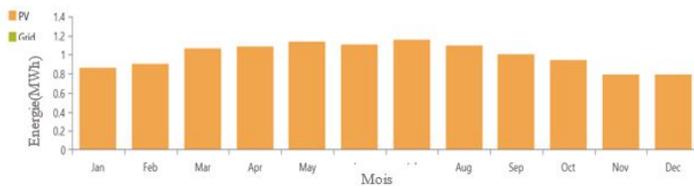


Figure IV.12 Production mensuelle dans site de Mecheria (connecté au réseau).

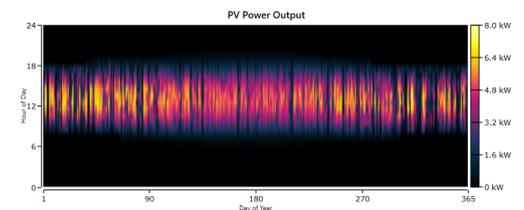


Figure IV.13 Spectrogramme de la production PV à Mecheria (connecté au réseau).

Pour le site de Mecheria , la production moyenne mensuelle d’énergie photovoltaïque (PV) suit une tendance saisonnière similaire à celle de Tlemcen. Les valeurs mensuelles varient de 0.8 MWh en décembre et janvier à 1.2 MWh de mai à août, montrant un pic de production durant les mois estivaux.

La carte de chaleur (voir la figure IV.13) révèle une variation diurne nette, avec des périodes de haute production d’énergie, principalement au milieu de la journée lorsque l’ensoleillement est maximal. Les zones jaunes et rouges indiquent des moments de production intense, tandis que la production diminue considérablement pendant la nuit.

En résumé, le site de Mecheria démontre un bon potentiel solaire avec une production d'énergie PV qui suit les cycles quotidiens et saisonniers d'ensoleillement, atteignant des pics en été et en milieu de journée.

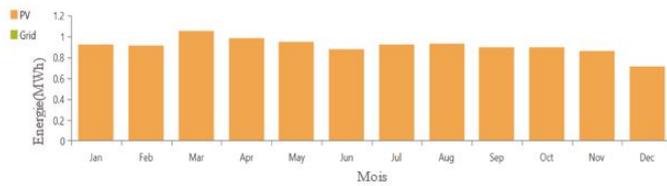


Figure IV.14 Production mensuelle dans site de Adrar (connecté au réseau).

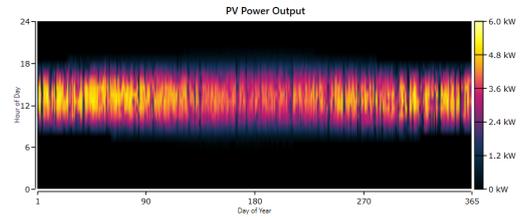


Figure IV.15 Spectrogramme de la production PV à Adrar (connecté au réseau).

La production d'énergie photovoltaïque PV à Adrar varie tout au long de l'année, avec un pic de 1,1 MWh en mars et un creux de 0,8 MWh en février. La contribution du réseau est négligeable, indiquant une forte autosuffisance grâce au PV.

Le spectrogramme montre des niveaux de puissance plus élevés en milieu de journée, avec des variations quotidiennes et saisonnières. Ces données soulignent l'efficacité de la production PV pour répondre aux besoins énergétiques d'Adrar, démontrant un potentiel de 0,8 à 1,1 MWh mensuel pour une autonomie énergétique durable.

Dans les figures ces dessous, nous avons présenté la distribution de la puissance en fonction de temps pour les trois sites (Tlemcen, Mecheria et Adrar)

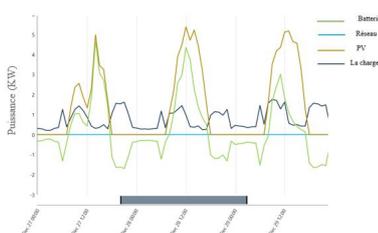


Figure IV.16 Distribution de la puissance en fonction du temps (dans site Tlemcen)

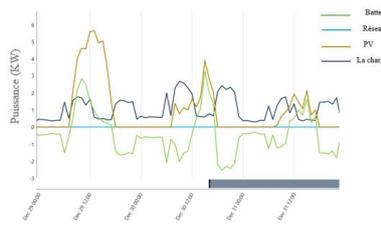


Figure IV.17 Distribution de la puissance en fonction du temps (dans site Mecheria) .

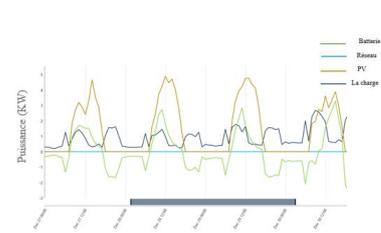


Figure IV.18 Distribution de la puissance en fonction du temps (dans site Adrar) .

Les trois sites, Tlemcen, Mecherie et Adrar, montrent des différences notables dans leurs systèmes énergétiques.

Tlemcen bénéficie d'une connexion stable au réseau électrique et voit des pics de production PV pendant la journée, avec une batterie qui se charge et se décharge en conséquence pour

stabiliser l'approvisionnement.

Mecheria, avec une stabilité de réseau potentiellement inférieure, pourrait voir plus de variabilité dans sa production et sa consommation, influencée par un ensoleillement différent.

Adrar, grâce à un ensoleillement intense, affiche une production PV très élevée avec des cycles fréquents de charge/décharge de la batterie et une demande énergétique potentiellement plus élevée. Chaque site utilise ses ressources de manière adaptée aux conditions locales pour répondre efficacement à la demande en énergie.

### IV.3 Etude économique

L'analyse économique permet de repérer les régions où l'investissement dans les panneaux solaires serait le plus avantageux. En comparant les dépenses liées à l'installation et les profits potentiels, les investisseurs peuvent optimiser leur capital. Dans les trois régions (Tlemcen, Mecheria et Adrar).

le tableau ci-dessous présente les frais liés à chaque composant utilisé ainsi que le coût total de l'installation PV pour les sites isolés et connectés au réseau.

	Tlemcen		Mecheria		Adrar	
	Site isolé	C. au réseau	Site isolé	C. au réseau	Site isolé	C.au réseau
PV (DA)	517000	517000	564000	564000	399500	399500
Batterie (DA)	520000	520000	680000	680000	360000	360000
Onduleur (DA)	140000	140000	140000	140000	140000	140000
Générateur diesel (DA)	200000	—	200000	—	200000	—
Diesel (DA)	0	—	0	—	0	—
Réseau (DA)	—	0	—	0	—	0
Système (DA)	1377000	1177000	1584000	1384000	1099500	899500

Tableau IV.1 *Coûts de différents systèmes en fonction de la localité .*

Le coût total des systèmes isolés est systématiquement plus élevé que celui des systèmes connectés au réseau. Par exemple, à Tlemcen, le coût d'un système isolé est de 1,377,000 DA, contre 1,177,000 DA pour un système connecté. À Mecheria, ce coût est de 1,584,000 DA pour un système isolé, contre 1,384,000 DA pour un système connecté. Enfin, à Adrar, un système isolé coûte 1,099,500 DA, tandis qu'un système connecté revient à 899,500 DA.

les systèmes isolés sont plus onéreux principalement en raison des coûts additionnels liés à

l'utilisation de générateurs diesel.

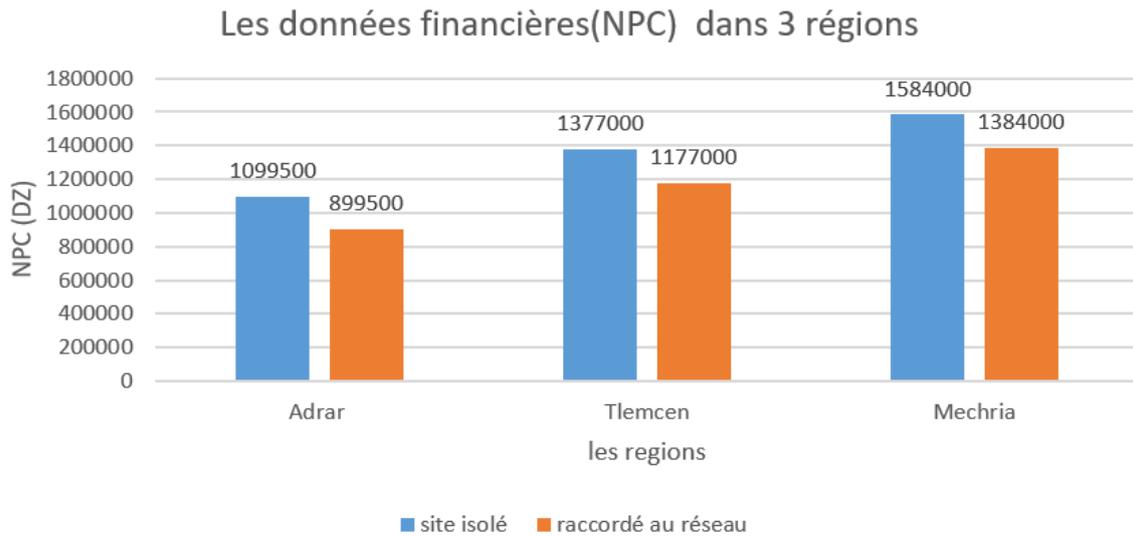


Figure IV.19 *Données financières NPC dans les 3 régions .*

A Adrar, les coûts s'affichent les plus bas, probablement en raison d'un environnement favorable aux installations photovoltaïques et d'infrastructures potentiellement moins coûteuses à mettre en place.

À Tlemcen, les coûts sont intermédiaires, ce qui pourrait s'expliquer par la présence de meilleures infrastructures existantes et un marché de l'énergie plus développé.

En revanche, Mechria présente les coûts les plus élevés, suggérant des défis logistiques ou des coûts supplémentaires pour la mise en place des infrastructures.

Cette étude montre que les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau sont économiquement plus avantageux que les systèmes isolés dans les trois régions étudiées, bien que les coûts varient selon la région. Les efforts devraient être concentrés sur l'amélioration des infrastructures de raccordement au réseau pour maximiser les économies et les avantages environnementaux des énergies renouvelables.

## Conclusion

La simulation de l'installation de systèmes photovoltaïques dans les sites isolés de Tlemcen, Mecheria et Adrar révèle des variations significatives en termes de production d'électricité et d'utilisation de générateurs diesel.

La production solaire varie selon les saisons, atteignant son maximum en été et son minimum en hiver, ce qui entraîne une dépendance accrue aux générateurs diesel pendant les périodes de faible irradiation solaire et de forte consommation énergétique. En moyenne, ces sites produisent environ 6 kWh par jour grâce aux panneaux solaires, mais la consommation d'électricité, surtout élevée en été et en hiver, nécessite le recours aux générateurs diesel pour compléter les besoins énergétiques.

Les sites isolés doivent gérer strictement leur autonomie énergétique, reposant principalement sur les panneaux solaires, les batteries et les générateurs diesel. Cette gestion stricte est particulièrement cruciale durant les périodes de forte consommation et de faible production solaire, comme en hiver et en été.

En revanche, les sites connectés au réseau bénéficient d'une plus grande stabilité et flexibilité, car ils peuvent échanger de l'électricité avec le réseau. Cette capacité d'échange réduit la dépendance aux générateurs diesel et optimise l'utilisation des batteries, rendant les installations photovoltaïques plus efficaces et durables.

Dans un premier temps, nous avons offert une introduction complète aux systèmes photovoltaïques, couvrant leur fonctionnement, les composants principaux, et les avantages et défis associés à leur utilisation. Cette base théorique nous a permis de comprendre l'importance croissante des énergies renouvelables et le rôle crucial des systèmes PV dans la transition énergétique mondiale.

Ensuite, nous sommes penchés sur la modélisation des systèmes photovoltaïques. Cette section a détaillé les méthodes et les outils utilisés pour représenter mathématiquement les performances des systèmes PV.

Par la suite, nous avons décrit le processus de dimensionnement et de simulation des systèmes PV à l'aide du logiciel Homer Pro. Ce logiciel nous a permis de simuler différents scénarios pour déterminer la configuration optimale d'un système PV, qu'il soit connecté au réseau ou en site isolé. L'utilisation de Homer Pro a facilité l'évaluation de diverses configurations pour maximiser l'efficacité et la rentabilité des systèmes PV.

Nous avons ensuite mené une étude comparative pour trois localités distinctes : Tlemcen, Mecheria et Adrar. Ces localités ont été choisies pour leurs caractéristiques climatiques et géographiques variées, offrant un cadre idéal pour analyser la performance des systèmes PV dans des conditions différentes. Les simulations ont permis de comparer la production d'énergie, le coût et l'efficacité des systèmes PV dans chaque région, fournissant des insights précieux pour le déploiement de ces technologies.

Enfin, nous avons présenté et discuté les résultats obtenus des simulations. Les analyses ont révélé des différences significatives entre les performances des systèmes PV dans les trois localités étudiées.

Cette étude a démontré l'importance de la modélisation, du dimensionnement et de la simulation dans le développement et l'optimisation des systèmes photovoltaïques. L'étude comparative pour Tlemcen, Mecheria et Adrar a mis en évidence les variations de performance en fonction des conditions locales, fournissant des recommandations spécifiques pour chaque région. Les résultats obtenus soutiennent l'idée que les systèmes PV peuvent être une solution viable et efficace pour répondre aux besoins énergétiques diversifiés de l'Algérie, tout en contribuant à la réduction de l'empreinte carbone et à la promotion des énergies renouvelables.

## Bibliographie

- [1] C2ai. "<https://www.c2ai.com/produits/pyrheliometre/>".
- [2] Oudrane Abdellatif, Benaoumeur Aour, B. Zeghmati, Xavier Chesneau, and Hamouda Messaoud. Étude fondamentale du gisement solaire pour une maison désertique située à adrar. 10:136–149, 01 2017.
- [3] M Hadji and S LARIBI. "extraction des paramètres du module photovoltaïque installé dans un site saharien". *"Mémoire de Master", "UNIVERSITE ADRAR"*, 2021.
- [4] Solaredge. "<https://www.solaredge.com/fr/produits/outils-logiciels/mapper>".
- [5] 1ère place d'affaires du photovoltaïque. "<https://www.pv-pro.fr/FR/en-savoir-plus/type-modules-panneaux-photovoltaiques.php>".
- [6] researchgate. "[https://www.researchgate.net/figure/Systeme-solaire-autonome\\_fig7\\_281589100](https://www.researchgate.net/figure/Systeme-solaire-autonome_fig7_281589100)".
- [7] C Lahore. Optimisation de commandes mppt. *"Mémoire d'ingénieur en Automatique"*, 2012.
- [8] A. Yahya and Y. Issakha. "Étude et modélisation d'un générateur photovoltaïque". *"Centre de Recherche Appliquée aux Energies Renouvelables 'CRAER' Université de Nouakchott"*, 2008.
- [9] M Kaddour and C.D Eddine. Modélisation d'un système photovoltaïque relié au réseau: Contrôle des puissances active et réactive. *"Mémoire de Master", "UNIVERSITE Maas-cara"*, 2018.
- [10] électronique1. "<http://electronique1.blogspot.com>".
- [11] W. F. Chouikhi. "réalisation d'une commande buck-boost pour pv". *"Thèse de Doctorat", "Université de Tlemcen"*, 2018.
- [12] Groupe roy Énergie. "<https://www.gre-enr.fr/centrale-photovoltaique/>".
- [13] researchgate. "<https://www.researchgate.net/onduleur-monophasé-en-pont>".
- [14] alamyimages. "<https://www.alamyimages.fr/photos-images/tlemcen-map>".

- [15] alamyimages. "<https://www.alamyimages.fr/naama-rouge-la-carte-de-l-algerie>".
- [16] dreamstime. "<https://fr.dreamstime.com/rouge-adrar-carte-algrie-illustration>".
- [17] solar.se. "<https://solar.se.com/us/wp-content/uploads/sites/7/2021/09/XW-230V-Datasheet-for-Australia.pdf>".
- [18] hxpcompany. "<https://hxpcompany.com/product/panneau-solaire-yingli-330w/>".
- [19] O. Bounefour and S. Boukendir. "diagnostic des défauts d'un système photovoltaïque". "doctoral dissertation". *"Mémoire de Master, Université de Jijel"*, 2022.
- [20] "<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1958-002B>".
- [21] H. Ben Cheikh El Hocine and M. Marir-Benabbas. Etude des performances électriques et thermiques d'un capteur hybride pvt. *Journal of Renewable Energies*, 16(2):257–268, 2013.
- [22] B Ould Bilal, V Sambou, CMF Kebe, M Ndongo, and PA Ndiaye. Etude et modélisation du potentiel solaire du site de nouakchott et de dakar. *J. Sci*, 7(4):57–66, 2007.
- [23] S Mouhous-Chaouchi. "étude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné". *"Université Abou Bekr Belkaid", "mémoire de Magister"* , *"Energies Renouvelables"*, Tlemcen, 2012.
- [24] M.R. Yaïche and SM. E. Bekkouche. Conception et validation d'un programme sous excel pour l'estimation du rayonnement solaire incident en algérie. cas d'un ciel totalement clair. *Journal of Renewable Energies*, 11(3):423–436, 2008.
- [25] S. Arab and D. Toudert. "étude d'un système photovoltaïque". 2017.
- [26] C.Chekirou and R. Chekirou. Mise au point d'un dispositif photovoltaïque de chargement de batteries via des bornes publiques. 2023.
- [27] F.Ghabraoui and S.Ktibe. Etude des propriétés thermoélectriques des modules pvt dans un site saharien. *"Mémoire de Master", "université d'Adrar"*, 2021.
- [28] N. El Kadri and A. Feradji. "étude comparative entre les différentes structures des installations hybrides.". 2022.
- [29] NIA Mohamed. "étude comparative des méthodes d'estimation du rayonnement solaire". *"Thèse de Magister en Physique"*, *"Université de Sétif"*, 1992.

- [30] A.Einstein. Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière. *Œuvres choisies 1 Quanta*, pages 132–148, 1905.
- [31] S.M. Naili and A. Achibi. "étude comparative entre un système pv avec générateur diesel électrique et un système pv connecté au réseau électrique pour alimenter un polyclinique. "Mémoire de Master", "Universté d'Adrar", 2019.
- [32] M. Latreche and F. Boudjadja. "étude et réalisation d'un système de nettoyage des panneaux solaires pv." "Mémoire de Master", "Université de Jijel", 2023.
- [33] M.C. Berralem and H.S Bouaza. "étude d'un chauffe-eau solaire". "Master en électromécanique, Centre Universitaire d'Ain-Temouchent", 2019.
- [34] Romênia G Vieira, Fábio MU de Araújo, Mahmoud Dhimish, and Maria IS Guerra. "a comprehensive review on bypass diode application on photovoltaic modules". *Energies*, 13(10):2472, 2020.
- [35] L. Moreau. "modélisation, conception et commande de génératrices à réluctance variable basse vitesse". "Thèse de Doctorat", "Université de Nantes", 2005.
- [36] R.Nairi and O.M. Rabhi. Analyse et simulation de performance d'un central photovoltaïque raccordé au réseau. *Université d'Adrar*, 2021.
- [37] F.Boussaâdia and L.Bouafia. "modélisation et simulation d'un système photovoltaïque". *Mémoire Master*, 2022.
- [38] M. A. Bessam. "modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque". "Mémoire de Master Faculté de Technologie, universite Annaba", 2018.
- [39] S Bensalem. "effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires". "Thèse de doctorat", "UNIVERSITE SETIF", 2018.
- [40] S. Essaghir. "gestion et stockage de l'énergie d'une chaîne de conversion photovoltaïque connectée au réseau électrique, formation doctorale en mathématiques et physiques appliquées, université beni-mellal, maroc ". "Thsèse de Doctorat", "Faculté des Sciences et des Techniques, Béni Mellal", 2020.
- [41] A.S Mansour and M.S Zaky. "a new extended single-switch high gain dc–dc boost converter for renewable energy applications". *Scientific Reports*, 2023.

- [42] F.Slama. "modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique". *"Mémoire de Master", "Université setif"*, 2018.
- [43] T Obeidi. "application des algorithmes génétiques dans la commande des hacheurs mppt". *"Alger, Ecole Nationale Polytechnique", "Mémoire de Master"*, 2006.
- [44] O. Degla and T Sayah. "etude par simulation d'un onduleur". *université de Ouergla, Thèse de Doctorat*, 2019.
- [45] I Panhwar, A. Sahito, and S. Dursun. "designing off-grid and on-grid renewable energy systems using homer pro software". *"Journal of International Environmental Application and Science"*, 2017.
- [46] S. Ghnaim and Y. Sebki. "simulation d'une central pv connecté au réseau électrique par deux logiciels (pvsyst et homer pro)". *Mémoire de Master", "Université Biskra "*, 2020.
- [47] Cerefe. "<https://www.cerefe.gov.dz>".

## Résumé

L'étude compare l'installation de systèmes photovoltaïques (PV) dans des zones isolées et connectées à Tlemcen, Adrar et Mecheria à l'aide de HOMER Pro. Elle inclut la collecte de données spécifiques, la configuration de solutions variées, et l'évaluation des performances et des coûts. L'objectif est d'identifier les configurations les plus rentables et adaptées à chaque site pour formuler des recommandations efficaces et durables en matière d'énergie, tenant compte des conditions géographiques et de la disponibilité du réseau électrique.

**Mots-clés :** PV, installation, zones isolées, connectées au réseau, Tlemcen, Adrar, Mecheria, HOMER Pro, performances, coûts, rentabilité, durabilité, recommandations.

## الملخص

الدراسة تقارن تثبيت أنظمة الطاقة الشمسية (PV) في المواقع المعزولة والمتصلة بالشبكة في تلمسان، أدرار، ومشربية باستخدام برنامج HOMER Pro. تشمل جمع البيانات الخاصة، وتكوين حلول متنوعة، وتقييم الأداء والتكاليف. الهدف هو تحديد التكوينات الأكثر ربحية وملائمة لكل موقع لصياغة توصيات فعالة ومستدامة لتلبية احتياجات الطاقة، مع مراعاة الظروف الجغرافية وتوفر الشبكة الكهربائية.

كلمات مفتاحية: تثبيت، المواقع المعزولة، المتصلة بالشبكة، تلمسان، أدرار، مشربية، HOMER Pro، أداء، تكاليف، ربحية، استدامة، توصيات.

## Abstract

The study compares the installation of photovoltaic (PV) systems in isolated and grid-connected locations in Tlemcen, Adrar, and Mecheria using HOMER Pro. It involves specific data collection, configuration of various PV solutions, and evaluation of performance and costs. The aim is to identify the most cost-effective and suitable configurations for each site to formulate effective and sustainable energy recommendations, considering geographical conditions and electrical grid availability.

**Keywords:** PV, installation, isolated sites, grid-connected sites, Tlemcen, Adrar, Mecheria, HOMER Pro, performance, costs, cost-effectiveness, sustainability, recommendations.