

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية
Université de Ghardaïa

N° d'enregistrement



كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département d'Automatique et Electromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine : Énergie Renouvelable

Filière : Énergie Renouvelable

Spécialité : Électrotechnique

Thème

Adaptation et rentabilité d'une installation photovoltaïque
autonome

Présenté par :

AZZAOUI Aya & MEHAYA Roua Alia

Soutenue publiquement en Juin 2024

Devant le jury composé de :

BENHALIMA Wissam	Maître de Conférences B	Université de Ghardaïa	Présidente
BELGHERRAS Sifia	Maître de Conférences A	Université de Ghardaïa	Encadrant
BEKKOUCHE Sidi Mohammed El Amine	Directeur de Recherche	URAER - Ghardaïa	Co-encadrant
BOUCHELGA Fatma	Maître de Conférences A	Université de Ghardaïa	Examineur
MAIZ HADJ AHMED Hamza	Dr. Maître Assistant B	Université de Ghardaïa	Examineur

Année universitaire 2023 / 2024

Remerciements

Au terme de ce travail, nous saisissons cette occasion pour exprimer nos vifs remerciements à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Nous adressons tout d'abord nos vifs et sincères remerciements à :

Notre Promotrice Dr **BELGHERRAS Sifia**, Maître de Conférences "A" à l'université de Ghardaïa.

Notre Co-encadreur Dr **BEKKOUCHE Sidi Mohammed El Amine**, Directeur de Recherche à l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables (URAER-Ghardaïa), Equipe Architecture Solaire et Bioclimatique, pour son aide, sa gentillesse, sa patience ainsi que les orientations prodiguées tout au long de ce travail.

La Présidente du jury, Dr. **BENHALIMA Wissam**, Maître de Conférences "B" à l'université de Ghardaïa.

Dr. **BOUCHELGA Fatma**, Maître de Conférences "A" à l'université de Ghardaïa de nous avoir honorée par sa présence et sa participation à ce jury.

Dr. **MAIZ HADJ AHMED Hamza** par leur assistance, expertise et pour les enrichissements qu'ils apporteront certainement à ce modeste travail.

Le mérite revient aussi à l'université de Ghardaïa et à l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables pour leur accueil et pour nous avoir permis de réaliser notre stage au niveau de l'URAER.

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude à l'ensemble de nos enseignants et responsables du projet du Master en Énergie Renouvelables " Électrotechnique " auquel nous avons eu le privilège d'y bénéficier.

Enfin, nous remercions nos parents, nos familles et nos amis pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Résumé

L'objectif des travaux est de déterminer la configuration optimale d'une installation photovoltaïque autonome en tenant en considération sa fiabilité et sa rentabilité financière. Une méthode simple a été utilisée pour ce dimensionnement tout en adaptant l'orientation et l'inclinaison des modules photovoltaïques. La durée de vie des batteries qui traduit l'autonomie du système a porté une attention particulière dans l'étude financière. Elles peuvent représenter jusqu'à presque 65% du coût global de l'installation sur sa durée de vie. Une installation photovoltaïque autonome est rentable si le coût de l'électricité conventionnelle est très cher, en raison des zones qui ne sont pas facilement accessibles ou qui n'ont pas l'accès à un réseau électrique. Un système photovoltaïque autonome ayant une tension de 12V est le plus économique si sa capacité de production journalière dépasse 3.24 kWh. Pour des charges plus faibles, un système photovoltaïque autonome d'une tension nominale de 48V représente une meilleure alternative. Une tension nominale de 24V engendre une installation plus coûteuse.

Mots clés

Photovoltaïque, Autonome, Batteries solaires, Coût, Rentabilité financière, Retour d'investissement.

الملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى تحديد التركيبة المثالية لنظام كهروضوئي مستقل مع مراعاة كل من موثوقيته وربحه المالي. تم استخدام طريقة بسيطة لحساب حجم النظام مع مراعاة اتجاه وميل الوحدات الكهروضوئية. تم إيلاء اهتمام خاص لعمر البطاريات، والذي يعكس استقلالية النظام، في الدراسة المالية، يمكن أن تمثل ما يصل إلى 65% من التكلفة الإجمالية للنظام طوال فترة حياته. يعتبر النظام الكهروضوئي المستقل مجديًا اقتصاديًا في الحالات التي يكون فيها سعر الكهرباء التقليدية مرتفعًا للغاية أو في المناطق التي يصعب الوصول إليها أو تفتقر إلى شبكة كهربائية. أثبتت الدراسة أن النظام الكهروضوئي المستقل بجهد 12 فولت هو الأكثر كفاءة اقتصاديًا إذا تجاوزت قدرته الإنتاجية اليومية 3.24 كيلو وات في الساعة. بينما تمثل أنظمة 48 فولت بديلاً أفضل للأحمال المنخفضة. أما أنظمة 24 فولت فتكون أكثر تكلفة.

الكلمات المفتاحية:

الكهروضوئية، نظام مستقل، بطاريات شمسية، التكلفة، الربحية المالية، عائد الاستثمار.

Abstract

The aim of the work is to determine the optimum configuration for a stand-alone photovoltaic system, taking into account its reliability and financial profitability. A simple method was used for this sizing, while adapting the orientation and inclination of the photovoltaic modules. Particular attention was paid to the financial study of batteries lifetime, which reflects the system's autonomy. They can represent up to almost 65% of the overall cost of the installation over its lifetime. A stand-alone photovoltaic installation is cost-effective if the cost of the conventional electricity is very high, due to areas that are not easily accessible or have no access to a power grid. A stand-alone photovoltaic system with a voltage of 12V is most economical if its daily production capacity exceeds 3.24 kWh. For lower loads, a stand-alone photovoltaic system with a nominal voltage of 48V is a better alternative. A nominal voltage of 24V means a more expensive installation.

Key words

Photovoltaic, Stand-alone, Solar batteries, Cost, Financial profitability, Return on investment.

Table des Matières

Table des matières.....	01
Nomenclature.....	04
Table des figures.....	06
Liste des tableaux.....	09
Introduction générale.....	10

Chapitre 1 Systèmes solaires photovoltaïques

1.1. Introduction.....	15
1.2. Les énergies renouvelables	16
1.2.1. La biomasse.....	16
1.2.2. L'énergie hydraulique.....	17
1.2.3. La géothermie	18
1.2.4. L'énergie solaire	19
1.2.4.1. Énergie photovoltaïque	20
1.2.4.2. Énergie thermique	20
1.2.5. Énergie éolienne.....	22
1.3. Avantage et inconvénients des énergies renouvelables	23
1.4. Énergie solaire photovoltaïque	24
1.4.1. Définition	24
1.4.2. L'effet photovoltaïque et principe de conversion	25
1.4.3. Cellule photovoltaïque ou photopile	27
1.4.4. Principaux types de cellules solaires.....	28
1.4.5. Paramètres photovoltaïques	29
1.4.5.1. Courant de court-circuit.....	30
1.4.5.2. Tension de circuit ouvert	30
1.4.5.3. Facteur de forme	31
1.4.6. Rendement d'une cellule solaire	31
1.5. Influence des facteurs météorologiques sur la puissance et la courbe IV	32
1.6. Applications et classification des systèmes photovoltaïques.....	33

1.6.1.	Système photovoltaïque autonome	33
1.6.2.	Système photovoltaïque raccordé au réseau.....	34
1.6.3.	Système photovoltaïque hybride.....	35
1.7.	Conclusion.....	35

Chapitre 2

Dimensionnement et adaptation d'une installation photovoltaïque

2.1.	Introduction.....	38
2.2.	Mesures, données radiométriques et météorologiques en Algérie	38
2.2.1.	Mesures du rayonnement solaire	40
2.2.2.	Instruments de mesure du rayonnement solaire	41
2.2.3.	Stations météorologiques et radiométriques en Algérie.....	42
2.3.	Calcul du rayonnement solaire.....	43
2.3.1.	Coordonnées solaires	43
2.3.1.1.	La latitude de lieu	44
2.3.1.2.	La longitude de lieu.....	45
2.3.1.3.	L'angle de déclinaison	45
2.3.1.4.	L'angle horaire	45
2.3.1.5.	Hauteur du soleil	46
2.3.1.6.	Azimut du soleil	47
2.3.1.7.	Orientation d'un plan.....	47
2.3.1.8.	Angle d'incidence sur un plan	47
2.3.2.	Modèle de Capderou & Cas d'un ciel clair	48
2.3.2.1.	Eclairement solaire sur un plan horizontal	49
2.3.2.2.	Eclairement solaire sur un plan d'inclinaison et d'orientation quelconque	49
2.4.	Concepts solaires à considérer dans un système photovoltaïque.....	51
2.4.1.	Principe général du montage.....	51
2.4.2.	L'orientation idéale	52
2.4.3.	L'inclinaison optimale.....	53
2.5.	Le climat et les données radiométrique de Ghardaïa	53
2.6.	Dimensionnement des systèmes photovoltaïques autonomes	58
2.7.	Dimensionnement d'un système PV autonome & Etude de cas	62
2.8.	Conclusion.....	66

Chapitre 3

Évaluation des Coûts et Rentabilité des Systèmes Photovoltaïques Autonomes

3.1. Introduction	68
3.2. L'influence de la charge sur le coût total de l'installation	69
3.3. Rentabilité, retour d'investissement et paramètres influents	80
3.4. Conclusion.....	87
Conclusion générale.....	88
Références.....	88

Nomenclature

V _{mpp}	Tension du point de puissance maximale (V)
V _{oc}	Tension en circuit ouvert (V)
I _{cc}	Courant en circuit court (A)
FF	Facteur de forme
$\frac{KT_c}{q}$	Potentiel thermodynamique
T _c	Température absolue (K)
q	Constante de la charge d'électron $1.602 \cdot 10^{-23}$ C
K	Constante de Boltzmann, $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K
I _{ph}	Courant photonique (A)
I _s	Courant de saturation (A)
P _{in}	Puissance lumineuse incidente (W)
d	L'angle de déclinaison (°)
H	L'angle horaire (°)
TSV	Le temps solaire vrai (h)
DE	Le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich (égale 1 h pour l'Algérie)
TL	Temps légal, celui donné par une montre (°)
Et	Correction de l'équation du temps
h	Hauteur du soleil (°)
a	Azimut du soleil (°)
i	Angle d'incidence sur un plan (°)
T _L *	Le facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair
T ₀	Le facteur de turbidité due à l'absorption gazeuse par la vapeur d'eau
z	L'altitude de lieu (km)
T ₁	Le facteur de trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O ₂ , CO ₂ , et O ₃) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh
T ₂	Le facteur de trouble dû à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption.

I_0	La constante solaire, sa valeur retenue est de 1367 W/m^2
D_{hor}	L'éclairement diffus observé sur une surface horizontale (W/m^2)
I_{hor}	L'éclairement solaire direct sur un plan horizontal (W/m^2)
G_{hor}	L'éclairement solaire globale sur un plan horizontal (W/m^2)
I_{inc}	L'éclairement direct incliné (W/m^2)
I_{nor}	L'éclairement solaire direct à incidence normale (W/m^2)
d_{ciel}	L'éclairement diffus incident en provenance du ciel (W/m^2)
β	L'inclinaison du plan d'incidence($^\circ$)
d_{sol}	L'éclairement diffus du sol (W/m^2)
$d_{\text{rétr}}$	L'éclairement diffus rétrodiffusé (W/m^2)
D_{inc}	L'éclairement solaire diffus incident sur un plan incliné (W/m^2)
G_{inc}	L'éclairement solaire global incliné (W/m^2)
β_{opt}	L'inclinaison optimale($^\circ$)
C_{Stokage}	Capacité du parc de batteries (Ah)
$C_{\text{Stokage_batterie}}$	Capacité du stockage d'une seule batterie (Ah)
$U_{\text{Système}}$	La tension du système photovoltaïque (V)
$U_{\text{b}_{\text{nm}}}$	La tension nominale de la batterie (V)
I_r	Le coefficient d'irradiation solaire (Wh/m^2)
E_{Produite}	Energie produite par le système photovoltaïque (Wh)
N	Numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.
CST	Capteurs solaires thermiques concentrés
CSP	Capteurs solaires à concentration
Si	Silicium
Cds	Sulfure de cadmium
As Ga	Arséniure de gallium
Cd Te	Tellure de cadmium
Ge	Germanium
InP	Phosphore d'indium

Table des figures

- Figure 1.1 :** Sources de biomasse.
- Figure 1.2 :** Energie hydraulique et turbine axiale à axe horizontal.
- Figure 1.3 :** Exemple de pompes à chaleur géothermiques.
- Figure 1.4 :** Exemples d'installations photovoltaïques, a : Projet de centrale PV à BeniOunif, b : Système PV intégré à une construction.
- Figure 1.5 :** Différentes technologies de l'énergie solaire thermique.
- Figure 1.6 :** Différentes technologies de l'énergie solaire thermique (systèmes de chauffage d'eau).
- Figure 1.7 :** Parcs éoliens terrestres et en mer.
- Figure 1.8 :** Schéma du principe de l'effet photovoltaïque [22].
- Figure 1.9 :** Principe d'une cellule photovoltaïque [26].
- Figure 1.10 :** Courbe IV d'une cellule solaire.
- Figure 1.11 :** Courbes caractéristiques I(V) et courbes de puissances P(V) d'une cellule PV en fonction de la température, cas d'un éclairement solaire de 1000 W/m^2 [30].
- Figure 1.12 :** Courbes caractéristiques I(V) et courbes de puissances P(V) d'une cellule PV en fonction de la température à une température de 25°C [31].
- Figure 1.13 :** Exemple d'un système PV autonome intégré [32].
- Figure 2.1 :** Exemple d'un système PV raccordé au réseau [32].
- Figure 2.2 :** Durée moyenne annuelle de l'ensoleillement mesuré (durée d'insolation), pour une période allant du 1er janvier 1992 au 31 décembre 2002 [35, 36].
- Figure 2.3 :** Valeurs moyennes de l'irradiation solaire globale horizontale annuelle mesurée pour une période allant du 1er janvier 1992 au 31 décembre 2002 [36].
- Figure 2.4 :** Les composantes du rayonnement solaire global [38].

- Figure 2.5 :** Instruments de mesures radiométriques : a - Pyranomètre, b - Pyranomètre avec ombrage, c - Pyréliomètre.
- Figure 2.6 :** Photo et schéma descriptif des Pyréliomètre qui mesurent la lumière solaire provenant d'une petite zone autour du soleil, caractérisée par un demi-angle d'ouverture de 2.5° .
- Figure 2.7 :** Répartition géographique des stations météorologiques algériennes [39].
- Figure 2.8 :** Sphère locale dans l'hémisphère : (a) nord, (b) sud [40].
- Figure 2.9 :** Schéma descriptif du repère horizontal [42].
- Figure 2.10 :** Distance requise pour éviter tout type d'obstacle [45].
- Figure 2.11 :** Éclairements solaires instantanés incidents sur un capteur horizontal correspondants à la journée 16 septembre. Irradiation journalière = 6592.37 Wh/m^2 .
- Figure 2.12 :** Éclairements solaires instantanés incidents sur un capteur incliné à 29.49° correspondants à la journée 16 septembre. Irradiation journalière = 7374.8 Wh/m^2 .
- Figure 2.13 :** L'irradiation globale annuelle moyenne inclinée à latitude du lieu [35, 36].
- Figure 2.14 :** L'irradiation globale annuelle moyenne reçue sur un plan vertical sud [35, 36].
- Figure 2.15 :** L'irradiation globale annuelle moyenne reçue sur un plan vertical est/ouest [35, 36].
- Figure 2.16 :** L'irradiation globale annuelle moyenne reçue sur un plan vertical sud-est / sud-ouest [35, 36].
- Figure 3.1 :** Schéma de principe du système photovoltaïque autonome avec stockage.
- Figure 3.2 :** Coûts total de l'installation photovoltaïque en fonction de la charge électrique journalière.
- Figure 3.3 :** Coût du banc de batteries comparé à celui du système photovoltaïque (1^{er} cas).
- Figure 3.4 :** Coût des batteries solaires par rapport à celui du système PV (1^{er} cas).

Figure 3.5: Temps de retour d'investissement déduit des points d'intersection des deux courbes de coûts (1^{er} cas) .

Figure 3.6 : Temps de retour d'investissement déduit de l'écart entre les deux courbes de coûts (1^{er} cas) .

Figure 3.7 : Coût du banc de batteries comparé à celui du système photovoltaïque 2^{ème} cas.

Figure 3.8 : Coût des batteries solaires par rapport à celui du système PV 2^{ème} cas.

Figure 3.9 : Temps de retour d'investissement déduit des points d'intersection des deux courbes de coûts 2^{ème} cas

Figure 3.10 : Temps de retour d'investissement déduit de l'écart entre les deux courbes de coûts 2^{ème} cas.

Liste des tableaux

- Tableau 1.1 :** Avantages et inconvénients des énergies renouvelables
- Tableau 1.2 :** Principales familles des cellules solaires photovoltaïques
- Tableau 2.1 :** Potentiel solaire des trois principales zones de l'Algérie
- Tableau 2.2 :** Les valeurs de l'azimut du plan en fonction des différentes directions
- Tableau 2.3 :** Irradiations solaires mesurées (réelles) et calculées (par kWh/m²) incidentes sur un capteur horizontal et un plan d'inclinaison optimale mensuelle, orienté au sud
- Tableau 2.4 :** Coût total et choix judicieux du banc de batteries solaires en tenant en considération les caractéristiques et la marque & Cas des batteries solaires à GEL de marques "VICTRON étanche" et "Plomb Carbone - UNIBAT"
- Tableau 2.5 :** Coût total et choix judicieux du générateur photovoltaïque en tenant en considération les caractéristiques et la marque des modules & Cas des panneaux solaires de type monocristallin de marques "VICTRON " et " UNISUN "
- Tableau 3.1 :** Coûts du système PV ayant une charge journalière de 2.5 kWh
- Tableau 3.2 :** Coûts du système PV ayant une charge journalière de 3 kWh
- Tableau 3.3 :** Coûts du système PV ayant une charge journalière de 3.5 kWh
- Tableau 3.4 :** Coûts du système PV ayant une charge journalière de 4 kWh
- Tableau 3.5 :** Coûts du système PV ayant une charge journalière de 4.5 kWh
- Tableau 3.6 :** Coûts du système PV ayant une charge journalière de 5 kWh
- Tableau 3.7 :** Coûts du système PV ayant une charge journalière de 5.5 kWh
- Tableau 3.8 :** Coûts du système PV ayant une charge journalière de 6 kWh
- Tableau 3.9 :** Coûts du système PV ayant une charge journalière de 6.5 kWh
- Tableau 3.10 :** Coûts du système PV ayant une charge journalière de 7 kWh
- Tableau 3.11 :** Rentabilité financière d'un système photovoltaïque autonome d'une capacité journalière de 4 kWh

Introduction générale

Introduction générale

La grande partie de l'énergie consommée par l'homme provient des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel...Etc.) dont l'utilisation massive conduit à l'épuisement de ses réserves et suppose une menace réelle à l'environnement, qui se manifeste, principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre.

La rationalisation de la consommation d'énergie est l'une des alternatives. Elle est un ensemble de procédures visant à réduire la quantité d'énergie utilisée à une quantité minimale sans compromettre le bien-être, ou à influencer le niveau de performance. Mais la première étape est de réduire cette consommation et les émissions à effet de serre. Elle consiste, en priorité, à mesurer et à analyser la quantité d'énergie consommée et sa destination. Cependant, parmi les meilleurs conseils pour économiser l'énergie est l'obtention de la meilleure offre d'énergie et l'économiser de l'argent en utilisant l'énergie solaire.

Par ailleurs, beaucoup de populations, spécialement dans les zones rurales isolées des pays en voie de développement qui bénéficient d'un fort ensoleillement, sont confrontées à de grands problèmes pour satisfaire leurs besoins en énergie. L'énergie solaire photovoltaïque de par ses caractéristiques de modularité qui permet de l'adapter à des besoins énergétiques divers, autonomie, fiabilité et viabilité sur le plan économique, peuvent apporter dans plusieurs situations de réelles solutions telles que l'éclairage public et domestique, le pompage d'eau pour la consommation et l'irrigation,...Etc.

Dans ce contexte, le choix de solutions adaptées dépend de plusieurs facteurs, tels que le contexte climatique, les performances énergétiques visées, les exigences en termes de confort thermique, acoustique, visuel et de qualité de l'air, ainsi que les contraintes techniques, économiques, architecturales et environnementales. Lors du processus de conception, il est souvent nécessaire de réaliser des études

paramétriques afin d'identifier les solutions optimales permettant d'atteindre les objectifs de performance énergétique dans un contexte climatique bien spécifique.

L'objectif des travaux présentés est de retenir et de mettre en place la configuration la plus optimale pour une installation photovoltaïque autonome en tenant en considération sa rentabilité financière. Pour ce faire, une bonne adaptation et un dimensionnement convenable d'un système photovoltaïque autonome intégré à un bâti sont fortement requis. Le dimensionnement d'un système photovoltaïque consiste à déterminer la taille et la capacité du système nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques d'une maison individuelle par exemple. Il prend en compte des facteurs tels que l'ensoleillement local, la consommation d'énergie prévue, l'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires, ainsi que l'espace disponible pour leur installation.

Ce type de réalisation présente un ensemble d'avantages importants, nous citons à titre indicatif :

- Production d'énergie inépuisable et non polluante,
- Rationalisation et réduction des coûts énergétiques,
- Flexibilité et l'indépendance vis-à-vis des fournisseurs d'électricité,
- Contribution au développement durable,
- Silencieuse et facile à installer et
- Durabilité environnementale.

Le mémoire est structuré autour de 3 chapitres :

Le premier est consacré à une aperçue générale sur les énergies renouvelables. Une attention toute particulière a été apportée sur l'effet, le principe de la conversion et les paramètres photovoltaïques, les types des cellules solaires, la classification des différents systèmes, les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Le second chapitre décrit de façon détaillée la méthodologie adoptée et déployée pour ces études. Une bonne adaptation et un dimensionnement convenable ont été visés.

Le dernier chapitre est destiné au montant relatif à l'investissement de tout projet photovoltaïque. Il nous montre plus précisément la part des coûts incontournables due aux matériels déployés en fonction de la puissance de l'installation. L'objectif est de réaliser une analyse des coûts pour un système photovoltaïque autonome en retenant des devis publiés à l'échelle internationale et en appliquant des estimations réelles et récentes basées sur l'examen de la durée de vie des composants, notamment les batteries solaires ou d'accumulateurs.

Chapitre 1

Systèmes Solaires Photovoltaïques

Chapitre 1 : Systèmes Solaires Photovoltaïques

1.1. Introduction

L'énergie solaire représente la lumière et la chaleur rayonnantes du soleil qui sont exploitées à l'aide d'une série de technologies telles que l'énergie solaire pour produire de l'électricité, l'énergie solaire thermique pour le chauffage solaire de l'eau et l'architecture solaire. Il s'agit d'une source essentielle d'énergie renouvelable. Ses technologies sont largement caractérisées comme étant des systèmes solaires passifs ou actifs, selon la façon dont elles capturent et distribuent l'énergie solaire ou la convertissent en énergie solaire [1].

Les techniques solaires actives comprennent l'utilisation de systèmes photovoltaïques, d'énergie solaire concentrée et de chauffe-eau solaires pour exploiter l'énergie. Les techniques solaires passives comprennent l'orientation d'un bâtiment vers le soleil, la sélection de matériaux ayant une masse thermique favorable ou des propriétés de dispersion de la lumière, et la conception d'espaces qui font circuler l'air de manière naturelle.

L'électricité solaire est une énergie solaire photovoltaïque et une source d'énergie renouvelable qui pourrait être une alternative aux autres sources énergétiques classiques. Elle est obtenue en convertissant la lumière du soleil en électricité grâce à une technologie basée sur l'effet photoélectrique. Il s'agit d'une énergie renouvelable, inépuisable et non-polluante qui peut être produite dans des installations allant de petits générateurs pour l'autoconsommation à de grandes centrales photovoltaïques [2].

Dans ce premier chapitre, une aperçue générale sur les énergies renouvelables a été apportée. La priorité a été accordée à l'énergie solaire photovoltaïque, plus particulièrement l'effet, le principe de la conversion et les paramètres photovoltaïques, les types des cellules solaires, la classification des différents systèmes, les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

1.2. Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie propres, inépuisables et de plus en plus compétitives. Elles se distinguent des combustibles fossiles principalement par leur diversité, leur abondance et leur potentiel d'utilisation partout sur la planète, mais surtout par le fait qu'elles ne produisent ni gaz à effet de serre à l'origine du changement climatique ni émissions polluantes. Leur coût est également en baisse et à un rythme durable, alors que l'évolution générale des coûts des énergies fossiles est inverse, malgré leur volatilité actuelle. Les principales sources sont données comme suit :

1.2.1. La biomasse

L'homme utilise l'énergie de la biomasse, c'est-à-dire l'énergie provenant d'organismes vivants, depuis que les premiers hominidés ont fait des feux de bois pour cuisiner ou se réchauffer.

La biomasse est organique, c'est-à-dire qu'elle est constituée de matériaux provenant d'organismes vivants, tels que les plantes et les animaux (substances végétales et animales). Les matériaux de la biomasse les plus couramment utilisés pour l'énergie sont les plantes, le bois et les déchets. C'est ce qu'on appelle les matières premières de la biomasse. On trouve entre autres l'engrais animal, les déchets biologiques ou les "plantes énergétiques".

La biomasse subit un processus de fermentation dans des centrales de biogaz spéciales. Cela permet d'obtenir un biogaz pouvant ensuite être brûlé afin de produire de la chaleur (directe), converti en électricité (directe) ou transformé en biocarburant (indirect). On crée ainsi de l'énergie propre à partir de matières premières renouvelables et de déchets de cuisine mais l'énergie de la biomasse peut également être une source d'énergie non-renouvelable [3].

Les différentes sources de la biomasse peuvent être résumées conformément à la figure 1.1 :



Figure 1.1 : Sources de biomasse

1.2.2. L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est un type d'énergie qui tire parti du mouvement de l'eau. Elle permet d'obtenir de l'électricité en utilisant l'énergie cinétique et l'énergie potentielle des courants et des chutes d'eau.

Il existe de nombreux types d'installations hydroélectriques, mais elles sont toutes alimentées par l'énergie cinétique de l'eau qui s'écoule en aval. Les roues à aubes peuvent convertir cette énergie directement en énergie mécanique (moulin à eau). L'hydroélectricité utilise aussi des turbines et des générateurs pour convertir cette énergie cinétique en électricité, qui est ensuite injectée dans le réseau électrique pour alimenter les foyers, les commerces et les industries [4]. La figure 1.2 donne quelques images descriptives d'une hydrolienne qui s'opère sous la mer pour la production de l'hydroélectricité.



Figure 1.2 : Energie hydraulique et turbine axiale à axe horizontal

1.2.3. La géothermie

L'énergie géothermique est l'énergie thermique provenant de la terre qui permet de chauffer, de refroidir et de produire de l'électricité. Elle peut être utilisée de différentes manières en fonction de la ressource et de la technologie choisies : chauffage et refroidissement des bâtiments grâce à des pompes à chaleur géothermiques, production d'électricité grâce à des centrales géothermiques, et chauffage de structures grâce à l'utilisation directe de l'énergie géothermique.

Pour capter l'énergie géothermique, un fluide est mis en circulation dans les profondeurs de la terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe captive naturelle, de l'eau injectée dans une roche chaude imperméable ou dans des puits spéciaux. Dans tous les cas, le fluide se réchauffe et remonte avec une température supérieure [3]. Les pompes à chaleur géothermiques peuvent remplir toutes sortes de fonctions, du chauffage et de la climatisation des habitations au réchauffement des piscines (figure 1.3).

1. Circulation du fluide (eau ou fluide frigorigène) dans une boucle de tuyaux
 2. Lorsqu'il fait froid, l'eau ou le fluide frigorigène se réchauffe en traversant la partie de la boucle qui est enterrée.
 3. Une fois revenu à la surface, l'eau ou le fluide frigorigène réchauffé transfère la chaleur dans le bâtiment.
 4. L'eau ou le réfrigérant se refroidit après avoir transféré sa chaleur. Il est pompé à nouveau sous terre où il se réchauffe à nouveau, recommençant ainsi le processus.
- Lors d'une journée chaude, le système peut fonctionner en sens inverse. L'eau ou le réfrigérant refroidit le bâtiment et est ensuite pompé sous terre où la chaleur supplémentaire est transférée au sol autour des tuyaux.
- 5.

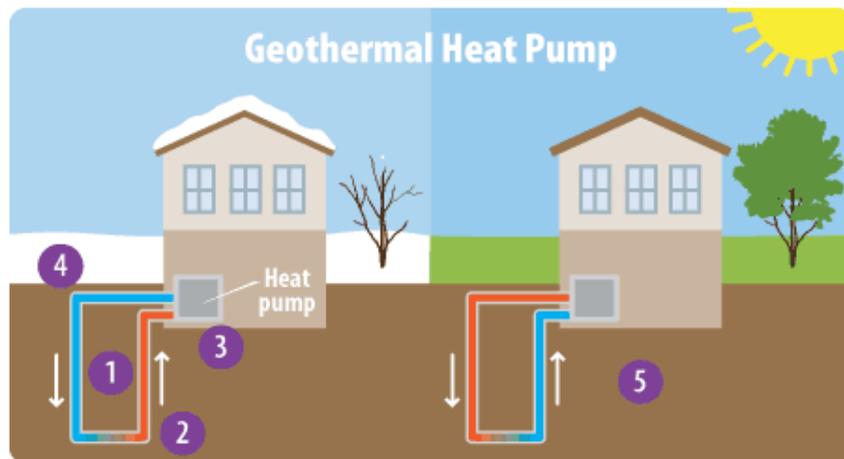


Figure 1.3 : Exemple de pompes à chaleur géothermiques

1.2.4. L'énergie solaire

L'énergie solaire est définie comme étant la transformation de l'énergie présente dans le soleil et fait partie des énergies renouvelables. Une fois que la lumière du soleil a traversé l'atmosphère terrestre, elle se présente en grande partie sous la forme de lumière visible et de rayonnement infrarouge. En tant que ressource énergétique renouvelable et propre, l'énergie solaire peut être utilisée pour remplacer les combustibles fossiles, en produisant de la chaleur, en créant des réactions chimiques et en générant de l'électricité.

En installant des panneaux ou des capteurs solaires, l'énergie solaire peut être utilisée pour capter l'énergie thermique (photo-thermique) ou pour produire de l'électricité (photovoltaïque). Les avancées technologiques ont transformé l'énergie solaire en l'une des plus efficaces et des plus abordables du secteur des énergies renouvelables. Cette source d'énergie illimitée, en plus de contribuer à la durabilité de

la planète, attire les investissements, crée des emplois et accroît la compétitivité des entreprises. À une époque où la protection de notre planète et de l'environnement est une priorité, nous devrions connaître les différents types d'énergie solaire, leur fonctionnement et la manière dont leur utilisation peut être étendue en tant que source de production d'électricité.

L'énergie solaire thermique et photovoltaïque sont les deux types d'énergie les plus connus, mais il existe d'autres applications tout aussi intéressantes.

1.2.4.1. Énergie photovoltaïque

Ce type d'énergie est produite par un système photovoltaïque, c'est-à-dire une installation qui produit de l'énergie électrique à l'aide de modules photovoltaïques, comme ceux de la figure 1.4, capables de transformer directement le rayonnement solaire en énergie électrique.

Les panneaux solaires contiennent des cellules photovoltaïques qui, lorsqu'elles reçoivent une lumière directe, s'ionisent et libèrent des électrons qui interagissent entre eux et génèrent un courant électrique. Ils sont très utilisés pour l'alimentation du site isolé (non connecté aux réseaux) en association avec un système de stockage [5].



Figure 1.4 : Exemples d'installations photovoltaïques, a : Projet de centrale PV à Beni-Ounif, b : Système PV intégré à une construction

1.2.4.2. Énergie thermique

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie et une technologie (figures 1.5 et 1.6) permettant d'exploiter l'énergie solaire pour produire de l'énergie thermique utilisée dans l'industrie et dans les secteurs résidentiel et commercial.

Les capteurs solaires thermiques sont classés comme des capteurs à basse, moyenne ou à haute température. Les capteurs à basse température sont généralement non vitrés et utilisés pour chauffer les piscines ou l'air de ventilation. Les capteurs à moyenne température sont aussi généralement des plaques plates, mais ils sont utilisés pour chauffer l'eau ou l'air à des fins résidentielles et commerciales. Les capteurs à haute température concentrent la lumière du soleil à l'aide de miroirs ou de lentilles et sont généralement utilisés pour répondre aux besoins de chaleur jusqu'à 300 °C / 20 bars de pression dans les industries et pour la production d'électricité. Il existe deux catégories de capteurs : les capteurs solaires thermiques concentrés (CST), qui répondent aux besoins de chaleur des industries, et les capteurs solaires à concentration (CSP), dont la chaleur est utilisée pour la production d'électricité [6].



Figure 1.5 : Différentes technologies de l'énergie solaire thermique (systèmes à concentration)



Figure 1.6 : Différentes technologies de l'énergie solaire thermique (systèmes de chauffage d'eau)

1.2.5. Énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'utilisation de l'énergie du vent pour produire un travail utile. Aujourd'hui, elle est surtout utilisée pour produire de l'électricité et elle est presque entièrement produite par des éoliennes, généralement regroupées en parcs éoliens et raccordées au réseau électrique. L'énergie éolienne est considérée comme une source d'énergie durable et renouvelable, et a un impact beaucoup plus faible sur l'environnement que la combustion de combustibles fossiles. L'énergie éolienne étant variable, elle nécessite un stockage d'énergie pour assurer un approvisionnement fiable en électricité.

La figure 1.7 donne un aperçu sur les parcs éoliens. Les parcs éoliens terrestres ont un impact visuel plus important sur le paysage que la plupart des autres centrales électriques par énergie produite [7,8]. Les parcs éoliens situés en mer ont un impact visuel moindre et des facteurs de capacité plus élevés, bien qu'ils soient généralement

plus coûteux [9]. L'énergie éolienne en mer représente actuellement environ 10 % des nouvelles installations [10].



Figure 1.7 : Parcs éoliens terrestres et en mer

1.3. Avantage et inconvénients des énergies renouvelables

Les avantages et les inconvénients des énergies renouvelables se classent selon le type d'énergie et conformément au tableau 1.1 suivant.

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients des énergies renouvelables

Type d'énergie	Avantages	Inconvénients
Énergie solaire [11]	<ul style="list-style-type: none"> - Une source d'énergie renouvelable, non-polluante et inépuisable - L'énergie solaire peut produire de l'électricité quel que soit le climat - Écologique jusqu'à la fin de sa vie - Le soleil brille partout et peut réduire la facture d'électricité des maisons - Les maisons équipées de panneaux solaires peuvent augmenter la valeur de l'habitation - Très bien adaptée aux batteries et au réseau électrique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Les coûts initiaux élevés de l'installation des panneaux - Le stockage de l'énergie solaire est coûteux - L'énergie solaire ne convient pas à tous les types de toits - Contraintes d'espace - Les panneaux solaires dépendent de la lumière du soleil - Dépendante des conditions météorologiques
Énergie éolienne [12]	<ul style="list-style-type: none"> - Une ressource qui favorise la croissance économique - Source d'énergie propre et renouvelable - Peu d'entretien, grande efficacité et rentable - Les éoliennes fonctionnent dans différents contextes 	<ul style="list-style-type: none"> - Manque de fiabilité : l'énergie éolienne doit rivaliser avec d'autres sources d'énergie à faible - Les sites éoliens idéaux se trouvent souvent dans des endroits isolés - Les turbines produisent du bruit et altèrent l'esthétique visuelle - Les éoliennes peuvent avoir un impact sur la faune locale
La géothermie & Énergie géothermique [13, 14]	<ul style="list-style-type: none"> - Toujours disponible - Ne nécessite pas de grands espaces - Énergie silencieuse - Elle fournit plus d'énergie pour la même puissance nominale - Les installations sont durables, sûres, fiables et nécessitent très peu d'entretien 	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilité d'épuisement des sources géothermiques - Coûts d'investissement élevés pour les systèmes géothermiques - Exigences foncières pour l'installation d'un système géothermique

Type d'énergie	Avantages	Inconvénients
L'énergie Hydraulique [15]	<ul style="list-style-type: none"> - Source d'énergie renouvelable, alimentée par l'eau, donc non-polluante - Source d'énergie qui permet à chaque État de produire sa propre énergie sans dépendre de sources d'énergie internationales - S'associe bien avec d'autres sources d'énergies renouvelables - Peut répondre aux pics de la demande d'électricité - Peu coûteuse à long terme 	<ul style="list-style-type: none"> - Quelques incidences négatives sur l'environnement : perturbation de l'équilibre écologique - Coûts initiaux élevés - Les installations dépendent de l'hydrologie locale
La biomasse [16]	<ul style="list-style-type: none"> - L'approvisionnement et le caractère renouvelable. - Durable, rentable et accessible. La disponibilité des matières premières est élevée et leur utilisation contribue au bon usage et à la conservation des zones naturelles. - Elle favorise l'économie circulaire et la création d'emplois - Elle réduit la dépendance à l'égard des combustibles fossiles. 	<ul style="list-style-type: none"> - Chère et nécessite beaucoup d'espace - Émet toujours des gaz à effet de serre et peut avoir donc un impact négatif sur l'environnement - Inefficace en termes de quantité d'énergie nécessaire pour produire de l'électricité
L'énergie solaire [17, 18]	<ul style="list-style-type: none"> - Fiable, respectueuse de l'environnement (renouvelable et durable) et excellente pour le chauffage et le refroidissement - Son potentiel est énorme. - Peut-être facilement convertie en d'autres formes d'énergie telles que l'énergie mécanique, électrique ou chimique, ce qui la rend polyvalente pour diverses applications. - Les systèmes d'énergie thermique peuvent être très fiables et fonctionner en continu avec un minimum d'entretien, en particulier dans les systèmes bien conçus et correctement entretenus. - Peut être stockée facilement à l'aide de méthodes telles que les matériaux à changement de phase, les réservoirs d'eau chaude ou le stockage de sels fondus, ce qui permet de stocker et de restituer l'énergie de manière efficace en fonction des besoins. - Bien adaptée aux batteries et au réseau électrique 	<ul style="list-style-type: none"> - Coûts initiaux élevés - Technologie spécifique à un lieu et dépendance de la lumière du soleil - Génère des déchets - Coût élevé des panneaux solaires et du système de stockage - Contraintes d'espace - L'impact environnemental de la fabrication - Rareté des matériaux.

1.4. Énergie solaire photovoltaïque

1.4.1. Définition

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus utilisées. Elle est transmise à la Terre à travers l'espace sous forme de photons et de rayonnements électromagnétique. Il s'agit de la conversion directe du rayonnement solaire en énergie électrique.

Une cellule photovoltaïque (PV), communément appelée cellule solaire, est un dispositif non-mécanique qui convertit directement la lumière du soleil en électricité. Certaines cellules photovoltaïques peuvent convertir la lumière artificielle en électricité. La lumière du soleil est composée de photons, ou de particules d'énergie solaire. Ces photons contiennent des quantités variables d'énergie qui correspondent aux différentes longueurs d'onde du spectre solaire [19].

1.4.2. L'effet photovoltaïque et principe de conversion

L'effet photovoltaïque est un processus qui génère une tension ou un courant électrique dans une cellule photovoltaïque lorsqu'elle est exposée à la lumière du soleil. C'est cet effet qui rend les panneaux solaires utiles, car les cellules du panneau convertissent la lumière du soleil en énergie électrique.

L'effet photovoltaïque a été découvert pour la première fois en 1839 par Edmond Becquerel. En faisant des expériences avec des cellules humides, il a remarqué que la tension de la cellule augmentait lorsque ses plaques d'argent étaient exposées à la lumière du soleil [20]. Ce n'est que dans les années 1950 que des chercheurs de la compagnie Américaine Bell ont réussie à découvrir de la première cellule solaire ; élément principal ou de base de la conversion Photovoltaïque [21].

L'effet photovoltaïque se produit dans les cellules solaires. Ces cellules solaires sont composées de deux types différents de semi-conducteurs - un de type p et un de type n - qui sont réunis pour créer une jonction p-n. En joignant ces deux types de semi-conducteurs, un champ électrique se forme dans la région de la jonction lorsque les électrons se déplacent vers le côté p positif et que les trous se déplacent vers le côté n négatif. Ce champ entraîne le déplacement de particules chargées négativement dans une direction et de particules chargées positivement dans l'autre [21]. La lumière est composée de photons, qui sont simplement de petits paquets de rayonnement électromagnétique ou d'énergie. Ces photons peuvent être absorbés par une cellule photovoltaïque. Lorsque la lumière d'une longueur d'onde appropriée est incidente sur ces cellules, l'énergie du photon est transférée à un atome du matériau semi-conducteur dans la jonction p-n. Plus précisément, l'énergie est transférée aux

électrons du matériau. Les électrons sautent alors dans un état d'énergie plus élevé, appelé bande de conduction. Il reste alors un "trou" dans la bande de valence d'où l'électron a sauté. Ce déplacement de l'électron sous l'effet de l'énergie ajoutée crée deux porteurs de charge, une paire électron-trou **[21]**.

Lorsqu'ils ne sont pas excités, les électrons maintiennent la cohésion du matériau semi-conducteur en formant des liaisons avec les atomes environnants et ne peuvent donc pas se déplacer. Cependant, dans leur état excité dans la bande de conduction, ces électrons sont libres de se déplacer dans le matériau. En raison du champ électrique créé par la jonction p-n, les électrons et les trous se déplacent dans la direction opposée à celle attendue. Au lieu d'être attiré par le côté p, l'électron libéré a tendance à se déplacer vers le côté n. Ce mouvement de l'électron crée un champ électrique. Ce mouvement de l'électron crée un courant électrique dans la cellule. Une fois que l'électron s'est déplacé, il reste un "trou", qui peut également se déplacer, mais dans la direction opposée à celle du côté p. C'est ce processus qui crée un courant dans la cellule **[22]** (figure 1.8).

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p **[23]**.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p sera chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée **[24, 25]**. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la

bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un pair électron - trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel [24-26].

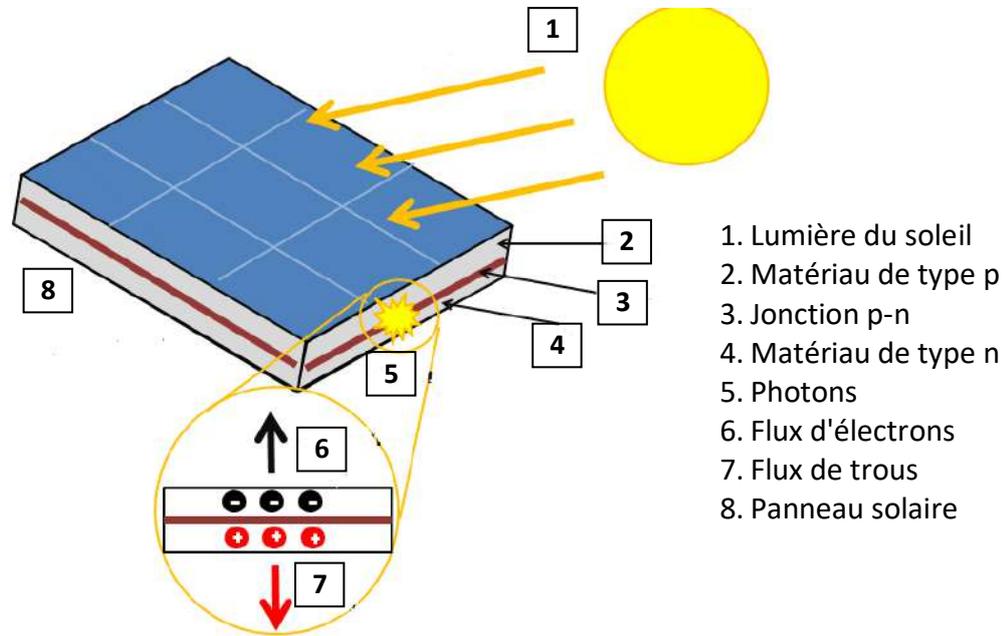


Figure 1.8 : Schéma du principe de l'effet photovoltaïque [22]

La figure 1.9 montre que sous l'action d'un rayonnement solaire, les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction pour former un générateur électrique.

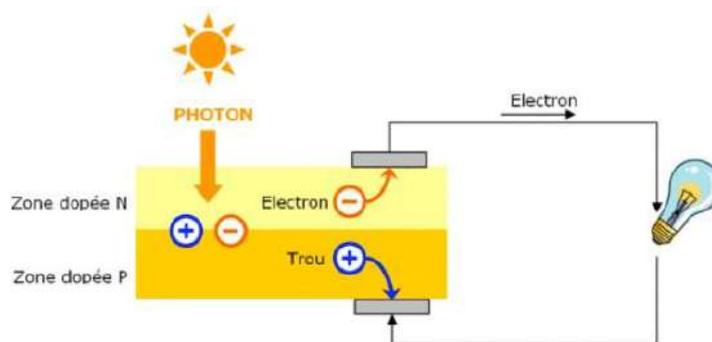


Figure 1.9 : Principe d'une cellule photovoltaïque [26]

1.4.3. Cellule photovoltaïque ou photopile

Les cellules solaires photovoltaïques (PV) sont des composants électroniques à semi-conducteur. Elles produisent de l'électricité par le biais de l'effet photovoltaïque en

absorbant la lumière du soleil et en utilisant cette énergie lumineuse pour créer un courant électrique. Un seul panneau solaire contient de nombreuses cellules photovoltaïques, et le courant créé par l'ensemble des cellules s'additionne pour produire suffisamment d'électricité pour alimenter votre école, votre maison et votre entreprise. Les matériaux les plus connus sont les suivants :

- Silicium (Si)
- Sulfure de cadmium (Cds)
- Arséniure de gallium (As Ga)
- Tellure de cadmium (Cd Te)
- Germanium (Ge)
- Phosphore d'indium (InP)

Toutefois, le matériau le plus couramment utilisé est le silicium pur obtenu à partir de la silice (quartz ou sable) par transformations chimiques et métallurgiques.

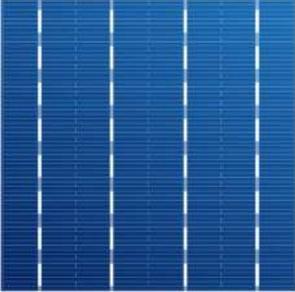
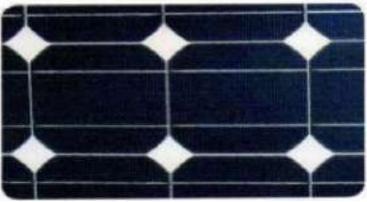
La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique se crée selon trois phénomènes physiques :

- Absorption de la lumière dans le matériau,
- Transfert d'énergie des photons aux particules chargées électriquement, et
- Collecte des charges métallurgiques [27]

1.4.4. Principaux types de cellules solaires

Une cellule photovoltaïque est la partie la plus importante d'un panneau solaire qui lui permet de convertir la lumière du soleil en électricité. Les cellules solaires peuvent être divisées en trois grands types : les cellules à base de silicium cristallin, les cellules solaires à couche mince et un développement plus récent qui est un mélange des deux autres. L'identification et les propriétés des principales familles de cellules solaires sont données par le tableau 1.2.

Tableau 1.2 : Principales familles des cellules solaires photovoltaïques

Cellule solaire monocristalline	Cellule solaire poly-cristalline	Cellule solaire amorphe
<ul style="list-style-type: none"> - Fabriquée par le monocristal de silicium par le procédé de Czochralski 	<ul style="list-style-type: none"> - Tout comme les cellules monocristallines, elles sont fabriquées à partir de silicium 	<ul style="list-style-type: none"> - Fabriquée par un procédé de vaporisation sous vide, disponible sur des substrats tels que le verre, les films plastiques flexibles ou l'acier inoxydable 
<ul style="list-style-type: none"> - Elaborée à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal (constituée de lingots de silicium) - Coût de fabrication élevé - Rendement : de 14 à 20%. Il est faible sous un faible éclairement - Durée de vie : importante ; 30 ans - Puissance : 100 à 150 Wc/m², 7 m² /kWc - Rendement faible sous un faible éclairement - Couleur : bleu foncé sobre et élégante, voir noire unie 	<ul style="list-style-type: none"> - La différence réside toutefois dans le processus de fabrication. Elle n'est pas constituée d'une structure cristalline unique et continue, mais elle est réalisée en fusionnant des cristaux minéraux coupés au cours de la production - Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins - Rendement : 11 à 15 % - Durée de vie : importante ; 30 ans - Puissance : 100 Wc/m², 8 m²/kWc - Rendement faible sous un faible éclairement - Couleur : bleu, mais non-uniforme avec des motifs créés par les différents cristaux (mosaïque de cristaux de silicium) 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies - Rendement faible : 5 à 9 % - Durée de vie : moins importante ; 20 ans - Puissance: 50 Wc/m², 16 m²/kWc - Fonctionnement correct avec un éclairement faible. Elle a un coefficient d'absorption beaucoup plus élevé dans le spectre visible (380nm-740nm) que les cellules en silicium cristallin - Peu sensible aux températures élevées - Utilisable en panneaux souples - Rendement faible en plein soleil - Performances diminuant avec le temps

1.4.5. Paramètres photovoltaïques

Étant donné qu'un module solaire n'est rien d'autre qu'une interconnexion de cellules solaires, des paramètres photovoltaïques similaires sont définis, tels que le rendement du module, le facteur de remplissage du module, la tension (V_{mpp}) et le courant

(I_{mpp}) du point de puissance maximale (MPP), la tension en circuit ouvert (V_{oc}) et le courant en circuit court (I_{cc}).

Bien que les paramètres photovoltaïques tels que la tension à circuit ouvert, le courant de court-circuit, la puissance de sortie maximale, le facteur de forme (FF) du composant soient généralement affectés par la température des cellules, l'influence maximale est enregistrée dans la tension en circuit ouvert. Généralement, ils sont déduits de la caractéristique courant-tension $I(V)$.

1.4.5.1. Courant de court-circuit

Le courant de court-circuit est le courant qui traverse la cellule solaire lorsque la tension aux bornes de la cellule solaire est nulle, c'est-à-dire lorsque la cellule solaire est court-circuitée.

Par définition, c'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Couramment noté " I_{cc} ", le courant de court-circuit est représenté sur la courbe de la figure 1.9. Il varie selon la longueur d'onde du rayonnement, la surface active de la cellule, la mobilité des porteurs, et il est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

1.4.5.2. Tension de circuit ouvert

La tension en circuit ouvert, " V_{oc} ", est la tension maximale disponible dans une cellule solaire, et se produit à courant nul (figure 1.9). Elle est déduite aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie.

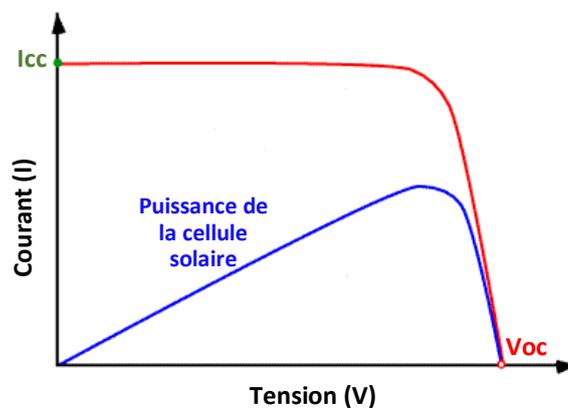


Figure 1.9 : Courbe IV d'une cellule solaire

La tension en circuit ouvert correspond à la valeur de la polarisation directe de la cellule solaire due à la polarisation de la jonction de la cellule solaire avec le courant généré par la lumière. Elle dépend aussi de l'éclairement de la cellule [28].

$$V_{oc} = \frac{K T_c}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (1.1)$$

$\frac{K T_c}{q}$: le potentiel thermodynamique

T_c : la température absolue

q : la constante de la charge d'électron $1.602 \cdot 10^{-23} \text{ C}$

K : la constante de Boltzmann, $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

I_{ph} : le courant photonique

I_s : le courant de saturation

1.4.5.3. Facteur de forme

Le facteur de remplissage ou facteur de forme, en anglais " Fill Factor FF" est essentiellement une mesure de l'efficacité d'un module photovoltaïque. La valeur maximale théorique dépend essentiellement du type de silicium utilisé. Cependant, un écart par rapport à la valeur attendue ou des variations de ce paramètre peuvent indiquer la présence d'un défaut.

Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule "Pmax" et la puissance $I_{cc} \times V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également [29].

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (1.2)$$

1.4.6. Rendement d'une cellule solaire

Le rendement d'une cellule solaire correspond au pourcentage d'énergie qu'elle peut capter pour une certaine quantité de lumière. Il désigne donc le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} [30].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{oc}}{P_{in}} \quad (1.3)$$

1.5. Influence des facteurs météorologiques sur la puissance et la courbe IV

Trois points de la courbe I-V peuvent être déduits : le point de court-circuit, la puissance maximale et le circuit ouvert. Ces points représentatifs sont, avec leur variation en fonction de la température, les informations normales figurant dans les fiches techniques des fabricants.

Conformément à la figure 1.10, la caractéristique I(V) et la puissance produite P(V) d'une cellule photovoltaïque illuminée varient en fonction des changements de température. Les températures plus élevées rendent les matériaux semi-conducteurs des cellules photovoltaïques plus conducteurs. Cela augmente le flux de porteurs de charges et réduit par conséquent la tension générée. Lorsque ces paramètres sont constants, plus la température est élevée, plus la tension est faible. Cela est considéré comme une perte de puissance. En revanche, si la température diminue par rapport aux conditions initiales, la tension et la puissance de la sortie PV augmentent.

De même, selon la figure 1.11, l'étude menée par Goyheix [31] a montré qu'avec l'augmentation de l'intensité lumineuse, les résistances de shunt des cellules solaires diminuent tandis que la résistance en série, le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, la puissance électrique, le facteur de remplissage et l'efficacité de conversion augmentent.

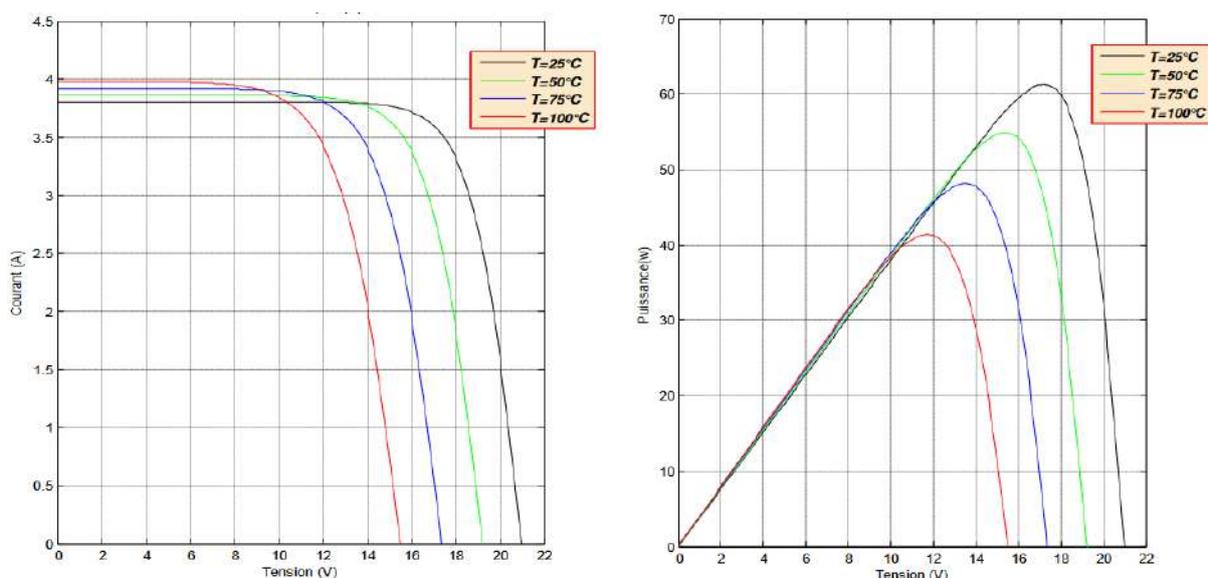


Figure 1.10 : Courbes caractéristiques I(V) et courbes de puissances P(V) d'une cellule PV en fonction de la température, cas d'un éclairement solaire de 1000 W/m² [30]

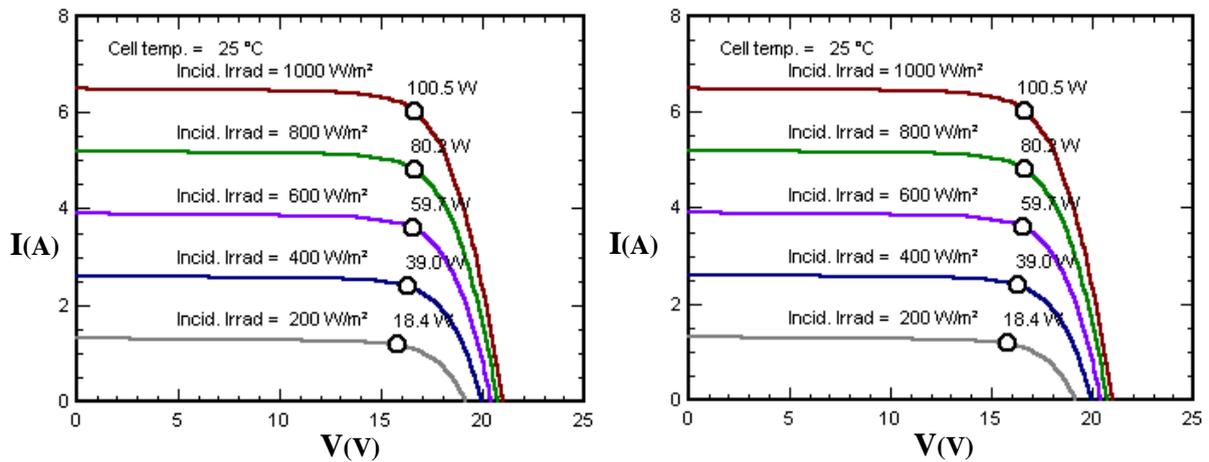


Figure 1.11 : Courbes caractéristiques I(V) et courbes de puissances P(V) d'une cellule PV en fonction de la température à une température de 25°C [31]

1.6. Applications et classification des systèmes photovoltaïques

Le contexte énergétique actuel fait que l'énergie photovoltaïque n'est pas compétitive face au prix de vente de l'électricité sur le réseau. Cependant, de nombreux pays ont mis en place des mesures économiques incitatives pour favoriser l'intégration des énergies renouvelables, dont le photovoltaïque. Parmi ces mesures, la subvention de l'investissement.

Il existe trois principaux types de systèmes solaires photovoltaïques : les systèmes raccordés au réseau, les systèmes hybrides et les systèmes hors réseau. Chaque type de système de panneaux solaires a ses avantages et ses inconvénients et tout dépend de ce que le client souhaite tirer de son installation de panneaux solaires.

1.6.1. Système photovoltaïque autonome

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont utilisés dans les zones qui ne sont pas facilement accessibles ou qui n'ont pas accès à un réseau électrique. Un système autonome est indépendant du réseau électrique, l'énergie produite étant normalement stockée dans des batteries.

Ils sont généralement conçus et dimensionnés pour alimenter certaines charges électriques en courant continu et/ou alternatif. Un système autonome typique se compose d'un ou de plusieurs modules photovoltaïques, de batteries et d'un régulateur de charge. Un onduleur peut également être inclus dans le système pour

convertir le courant continu généré par les modules photovoltaïques en courant alternatif nécessaire aux appareils normaux. La figure 1.12 présente le schéma d'un système autonome. Comme on peut le voir, le système peut satisfaire simultanément les charges en courant continu et en courant alternatif.

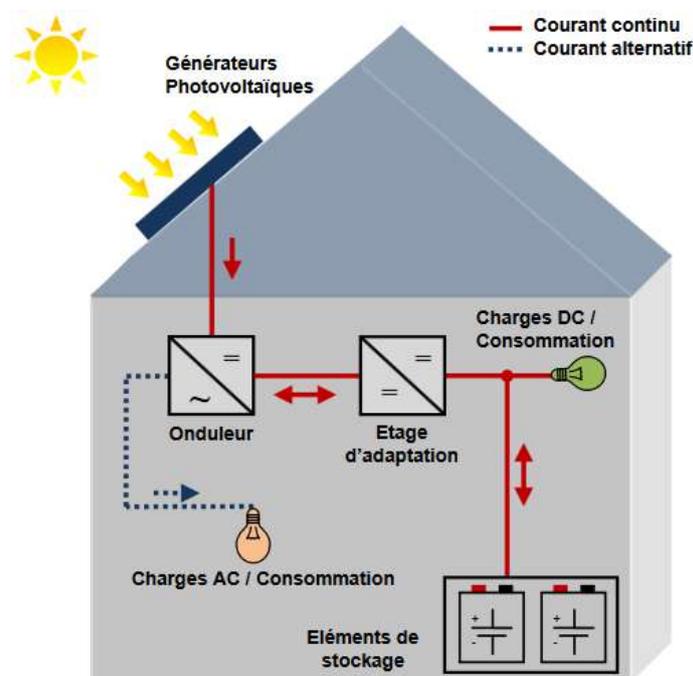


Figure 1.12 : Exemple d'un système PV autonome intégré [32]

1.6.2. Système photovoltaïque raccordé au réseau

Un système photovoltaïque raccordé au réseau est un système de production d'électricité solaire raccordé au réseau électrique. Il se compose de panneaux solaires, d'un ou plusieurs onduleurs, d'une unité de conditionnement d'énergie et d'un équipement de raccordement au réseau.

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur continu/alternatif (DC/AC). Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. L'énergie produite est consommée sur place, le surplus étant injecté dans le réseau qui alimente les maisons en nuit ou pendant les jours non ensoleillés. La figure 1.13 représente un schéma descriptif d'un système PV connecté au réseau.

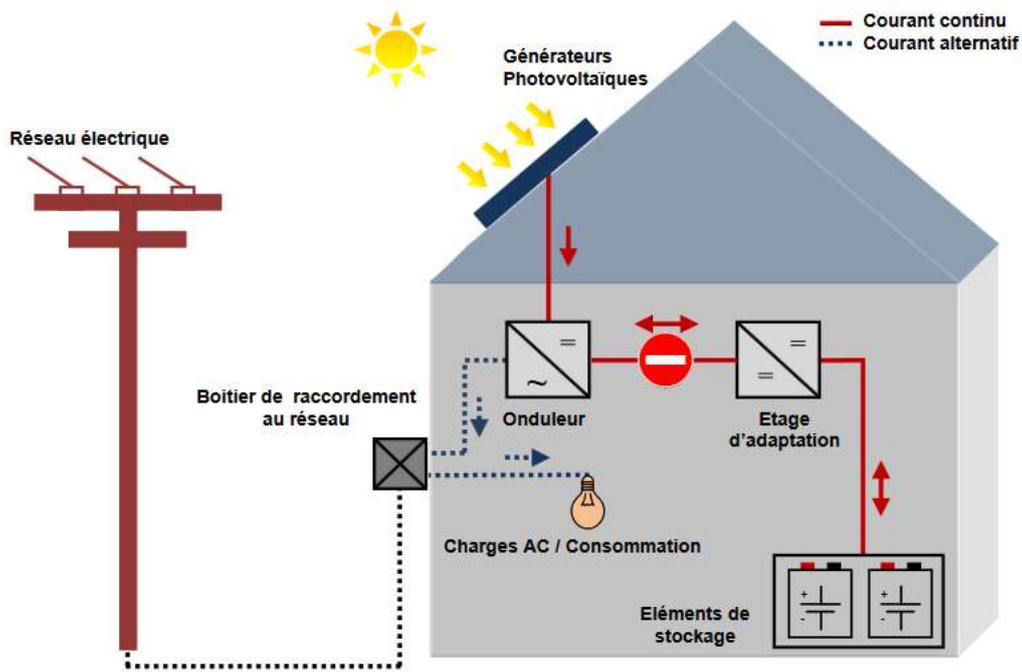


Figure 1.13 : Exemple d'un système PV raccordé au réseau [32]

1.6.3. Système photovoltaïque hybride

Un système solaire hybride est un système d'énergie renouvelable qui utilise des panneaux solaires photovoltaïques pour produire de l'énergie propre afin d'alimenter une charge d'une maison. Un système solaire hybride passe intelligemment de l'énergie solaire au stockage sur batterie et à l'alimentation du réseau. Il vous permet d'éviter d'utiliser l'électricité du réseau aux heures de pointe, ce qui se traduit par des économies sur la facture.

1.7. Régulateur de charge

Le régulateur de charge principalement sert avant tout à contrôler l'état de la batterie. Le champ solaire est connecté à l'entrée du régulateur et la batterie à sa sortie. Lorsque la tension batterie est inférieure à la tension de régulation, le régulateur fait fonctionner le générateur photovoltaïque à puissance maximale P_{mpp} et transfère cette puissance à la sortie. Le régulateur MPPT suit en permanence la tension maximale de puissance V_{mp} des modules photovoltaïques. Il balaye une plage de tensions en entrée pour déterminer où se situe la puissance maximale délivrée par les modules. Le régulateur MPPT prélève ensuite cette puissance à la tension V_{mp} et la

convertit vers une tension plus basse pour la charger dans les batteries. Cette conversion vers une tension plus basse a pour effet d'augmenter le courant de charge.

L'objectif principal du régulateur MPPT est donc de maximiser l'efficacité de la conversion d'énergie solaire en ajustant la tension et le courant de manière à obtenir la puissance maximale possible des modules photovoltaïques, tout en respectant les caractéristiques et les limites des batteries.

1.8. Le système de conversion

L'onduleur est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue. Un onduleur est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde. Les onduleurs intègrent de base plusieurs sécurités :

- Protection contre la surcharge
- Protection contre le court-circuit
- Protection en température
- Protection contre une tension trop élevée ou trop faible (paramétrable le plus souvent)

L'onduleur doit tolérer une large plage de tension en entrée (-10% à +30%) à cause des variations de tension nominale de la batterie selon les différentes conditions de fonctionnement.

1.9. Conclusion

L'intégration des systèmes solaires implique le développement de technologies et d'outils qui permettent d'intégrer l'énergie solaire, tout en maintenant la fiabilité, la sécurité et l'efficacité énergétique.

Le déploiement massif de l'énergie photovoltaïque, prévu dans les années à venir, pose de nouveaux défis en matière de contrôle des variations de puissance. L'intégration optimale du photovoltaïque est fortement influencée par les paramètres indiqués précédemment et par l'objectif de l'optimisation. En outre, l'intégration sur cadre bâti d'une maison, par exemple, semble pertinente pour améliorer l'autoconsommation.

Chapitre 2

Dimensionnement et Adaptation d'une Installation Photovoltaïque

Chapitre 2 : Dimensionnement et Adaptation d'une Installation Photovoltaïque

2.1. Introduction

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont généralement une alternative à l'alimentation électrique. Ils comprennent généralement des modules de charge solaire, des batteries de stockage et des commandes ou régulateurs. Les systèmes installés au sol ou sur le toit nécessitent une structure de montage et, si une alimentation en courant alternatif est souhaitée, un onduleur est également nécessaire.

L'objectif principal de ce chapitre est de faire intervenir une bonne adaptation et un dimensionnement convenable d'un système photovoltaïque autonome intégré à un bâti. Un bon dimensionnement revient à déterminer le nombre nécessaire de panneaux solaire constituant le champ photovoltaïque ainsi que la capacité de charge de la batterie pour obtenir un système photovoltaïque assurant la couverture des besoins de la charge à tout instant.

Dans ce contexte, l'importance de l'énergie solaire est soulignée par sa capacité à produire de l'électricité de manière durable, à réduire la dépendance à l'égard des centrales électriques à combustibles fossiles et à diminuer les émissions de gaz à effet de serre. L'énergie solaire est un moteur essentiel pour aider notre pays à atteindre leurs objectifs ambitieux en matière d'énergie propre. Le soleil est une ressource gratuite, durable et propre. Nous pouvons donc l'exploiter à la place de l'électricité conventionnelle en Algérie. L'énergie solaire peut être utilisée pour chauffer, éclairer et répondre à d'autres besoins liés à l'électricité dans les maisons et les bâtiments.

2.2. Mesures, données radiométriques et météorologiques en Algérie

En raison de sa situation géographique, l'Algérie possède le potentiel d'énergie solaire le plus élevé de la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (MENA) et l'un des

plus importants au monde. En effet, le potentiel énergétique solaire de l'Algérie est estimé à 13.9 TWh par an [33]. De plus, la durée annuelle moyenne d'ensoleillement dans la zone côtière de l'Algérie est estimée à 2650 heures. Dans les hauts plateaux, elle atteint 3000 heures, tandis que dans le Sahara, elle atteint 3500 heures [34].

La cartographie de la durée d'insolation mesurée pendant dix ans (1992-2002) est donnée par la figure 2.1.

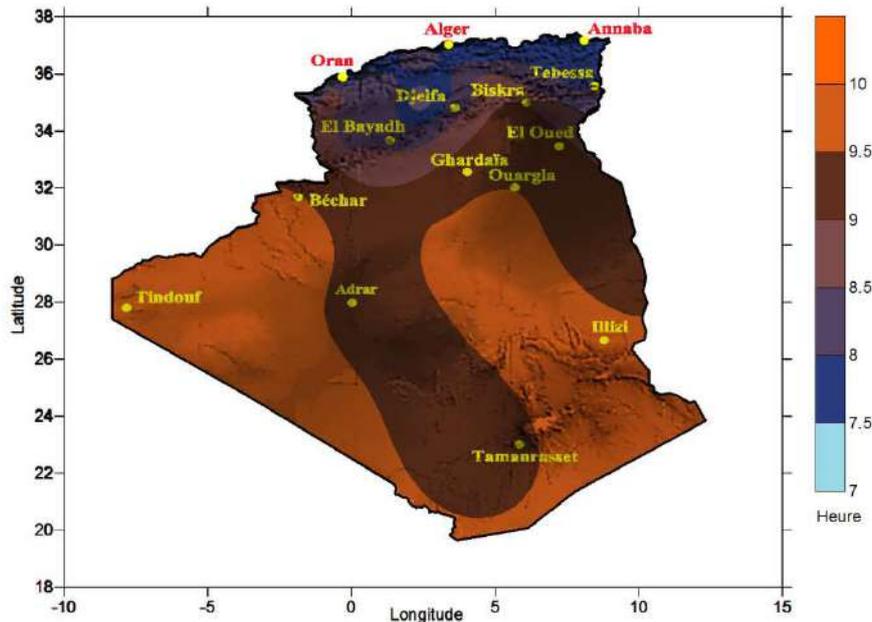


Figure 2.1 : Durée moyenne annuelle de l'ensoleillement mesuré (durée d'insolation), pour une période allant du 1^{er} janvier 1992 au 31 décembre 2002 [35, 36]

La figure indique que la durée d'insolation au nord de l'Algérie a varié de 5 heures/jour (hiver) à plus de 11 heures /jour (été). Au sud, cette durée a dépassé les 8 heures/jour en hiver et a pu atteindre les 12 heures/jour durant la saison estivale [35, 36]. Cette durée d'insolation reflète la grande disponibilité de l'énergie solaire sur le territoire national.

L'irradiation solaire reçue sur un plan horizontal dépasse les 4.5 kWh/m²/jour sur la globalité du territoire national. Les données publiées indiquent que la valeur moyenne de l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale est supérieure à 4.7 kWh/m²/j au nord et à 7.1 kWh/m²/jour au sud du pays comme le montre la figure 2.2. Les valeurs estimées placent l'Algérie parmi les pays qui possèdent le plus grand gisement (niveau d'irradiation solaire) au monde avec 1700 kWh/m²/an au nord et

2650 kWh/m²/an au sud. Faisant suite à cet énorme potentiel, nous pouvons en déduire que notre pays figure parmi les régions les plus favorables à l'utilisation de l'énergie solaire.

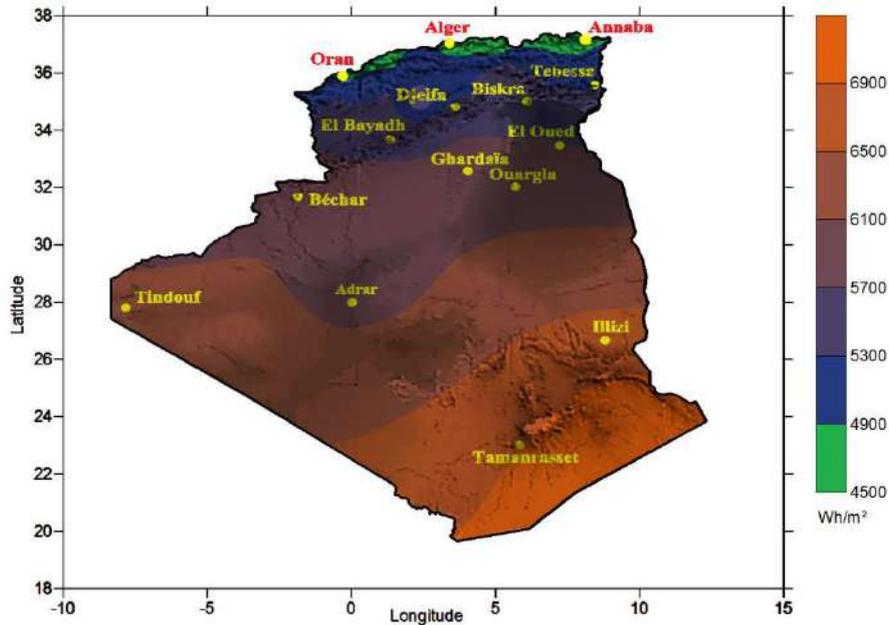


Figure 2.2 : Valeurs moyennes de l'irradiation solaire globale horizontale annuelle mesurée pour une période allant du 1^{er} janvier 1992 au 31 décembre 2002 [36]

Le tableau 2.1 donne un état récapitulatif de ce potentiel dans les principales zones (côtière, des hauts plateaux et au Sahara) [37].

Tableau 2.1 : Potentiel solaire des trois principales zones de l'Algérie

Zones	Zone côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée d'insolation (heures\ an)	2650	3000	3500
Irradiation solaire (kWh\ m ² \ an)	1700	1900	2650
Potentiel solaire (TWh\ jours)	443.96	1240.89	14870.63

2.2.1. Mesures du rayonnement solaire

Les mesures de l'énergie solaire sont généralement exprimées en tant que rayonnement total sur une surface horizontale ou inclinée. Les données du rayonnement pour les systèmes électriques solaires (photovoltaïques) sont souvent représentées en kilowattheures par mètre carré (kWh/m²). Le rayonnement global est le rayonnement solaire total atteignant le sol. Il se compose des rayonnements solaires

direct, diffus et réfléchi (figure 2.3). En règle générale, le rayonnement global et le rayonnement diffus sont mesurés par rapport au plan horizontal. Le rayonnement diffus est dispersé par les constituants de l'atmosphère, tels que les nuages et la poussière. Le rayonnement direct est intercepté sans entrave, en ligne directe avec le soleil.

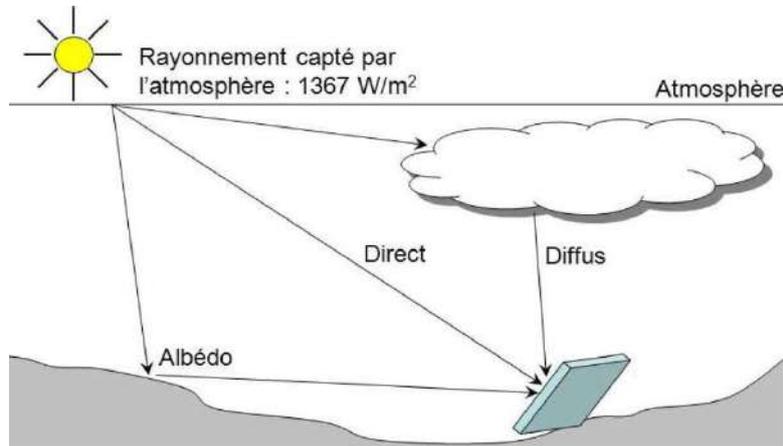


Figure 2.3 : Les composantes du rayonnement solaire global [38]

2.2.2. Instruments de mesure du rayonnement solaire

Les pyranomètres sont des radiomètres conçus pour mesurer l'irradiation d'une surface plane, généralement due au rayonnement solaire. Son capteur est doté d'une surface radiative horizontale qui absorbe l'énergie du rayonnement solaire provenant de l'ensemble du ciel. Les pyranomètres les plus utilisés de nos jours sont de type thermopile où le capteur de rayonnement a fondamentalement la même structure que celle d'un pyréliomètre thermoélectrique. Il peut être également utilisé pour la mesure du rayonnement solaire diffus, il suffit juste d'éliminer la composante directe du flux solaire via un petit disque d'ombrage monté sur un système de poursuite solaire automatisé (figure 2.4).

Un pyréliomètre est un appareil qui mesure l'irradiation solaire provenant directement du soleil. Il mesure le rayonnement solaire direct qui exprime la quantité d'énergie solaire par unité de surface et par unité de temps incidente sur un plan normal à la position du soleil dans le ciel (provenant directement du soleil lui-même).

Un pyréliomètre doit être monté sur un suiveur solaire : un dispositif qui oriente l'instrument vers le soleil tout au long de la journée (figure 2.5).



Figure 2.4 : Instruments de mesures radiométriques : a - Pyranomètre, b - Pyranomètre avec ombrage, c - Pyréliomètre.

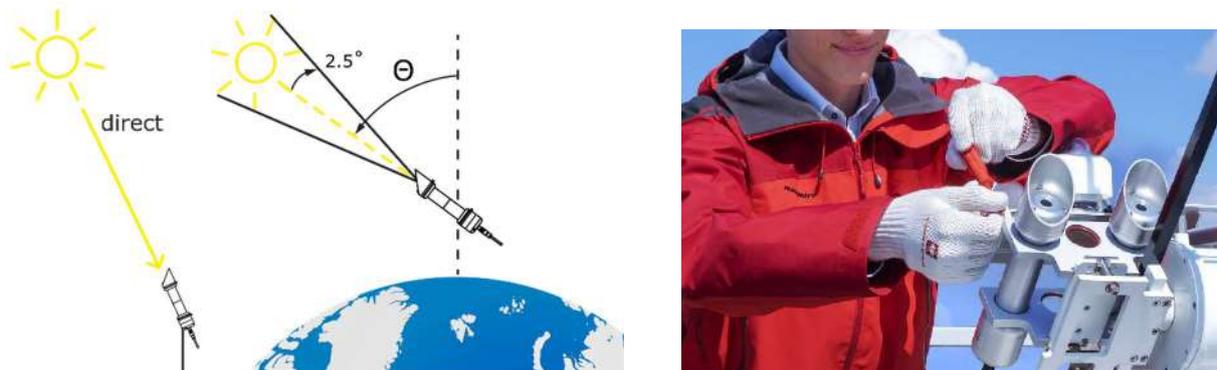


Figure 2.5 : Photo et schéma descriptif des pyréliomètres qui mesurent la lumière solaire provenant d'une petite zone autour du soleil, caractérisée par un demi-angle d'ouverture de 2.5° .

2.2.3. Stations météorologiques et radiométriques en Algérie

Les cinquante-quatre stations de l'office national de météorologie ONM assurent les valeurs instantanées de la température, de l'humidité et de la durée d'insolation des différentes régions afin d'élaborer des prévisions météorologiques quotidiennes.

La figure 2.6 montre la répartition des stations à travers le territoire national. Il a été remarqué que la répartition est importante au Nord avec un taux de 76%. Le reste des stations au nombre de 18 sont réparties au sud inégalement en raison du grand espace qui reste très mal couvert dans le grand sud algérien.

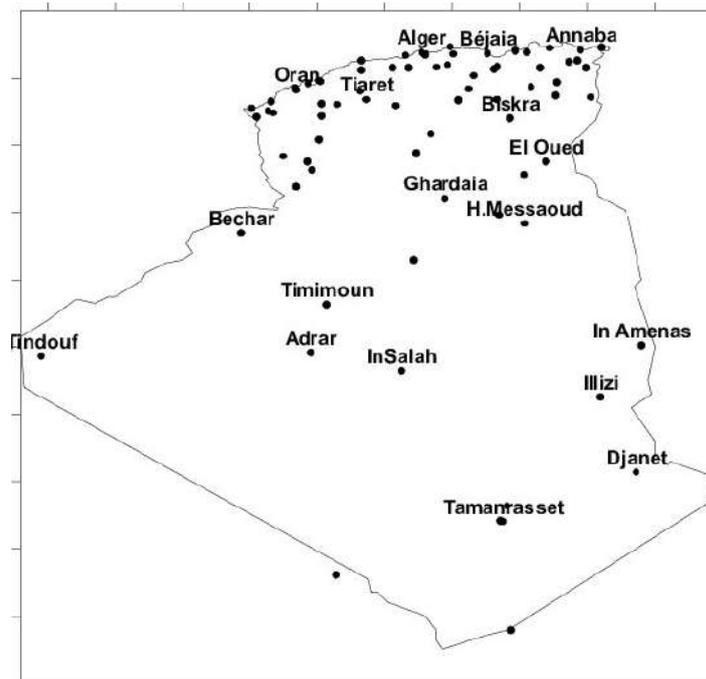


Figure 2.6 : Répartition géographique des stations météorologiques algériennes [39].

2.3. Calcul du rayonnement solaire

L'objectif est de développer une technique de calcul simple pour la densité du flux solaire sur des surfaces horizontales et inclinées.

2.3.1. Coordonnées solaires

Les coordonnées solaires varient toutefois d'un jour à l'autre, car la terre tourne sur son orbite autour du soleil. La position du soleil dans le ciel dépend à la fois de l'heure et de la position géographique de l'observation à la surface de la terre. Lorsque la terre tourne autour du soleil au cours d'une année, le soleil semble se déplacer par rapport aux étoiles fixes de la sphère céleste, le long d'une trajectoire circulaire appelée écliptique.

La position du soleil par rapport à un observateur à la surface de la terre est une donnée importante nécessaire pour modéliser les performances d'un système photovoltaïque. Les angles solaires sont des facteurs extérieurs cruciaux à prendre en considération lors de l'installation d'un panneau photovoltaïque. Nous nous concentrerons donc sur les différents types d'angles solaires.

La figure 2.7 montre que la terre est un ellipsoïde arrondi d'une circonférence d'environ 40 000 km. Elle se trouve à environ huit minutes-lumière du Soleil et tourne

autour de lui, mettant un an (environ 365.25 jours) pour effectuer une révolution. La terre tourne autour de son axe en un peu moins d'un jour (environ 23 heures et 56 minutes). L'axe de rotation de la terre est incliné par rapport à la perpendiculaire à son plan orbital autour du soleil, ce qui produit des saisons.

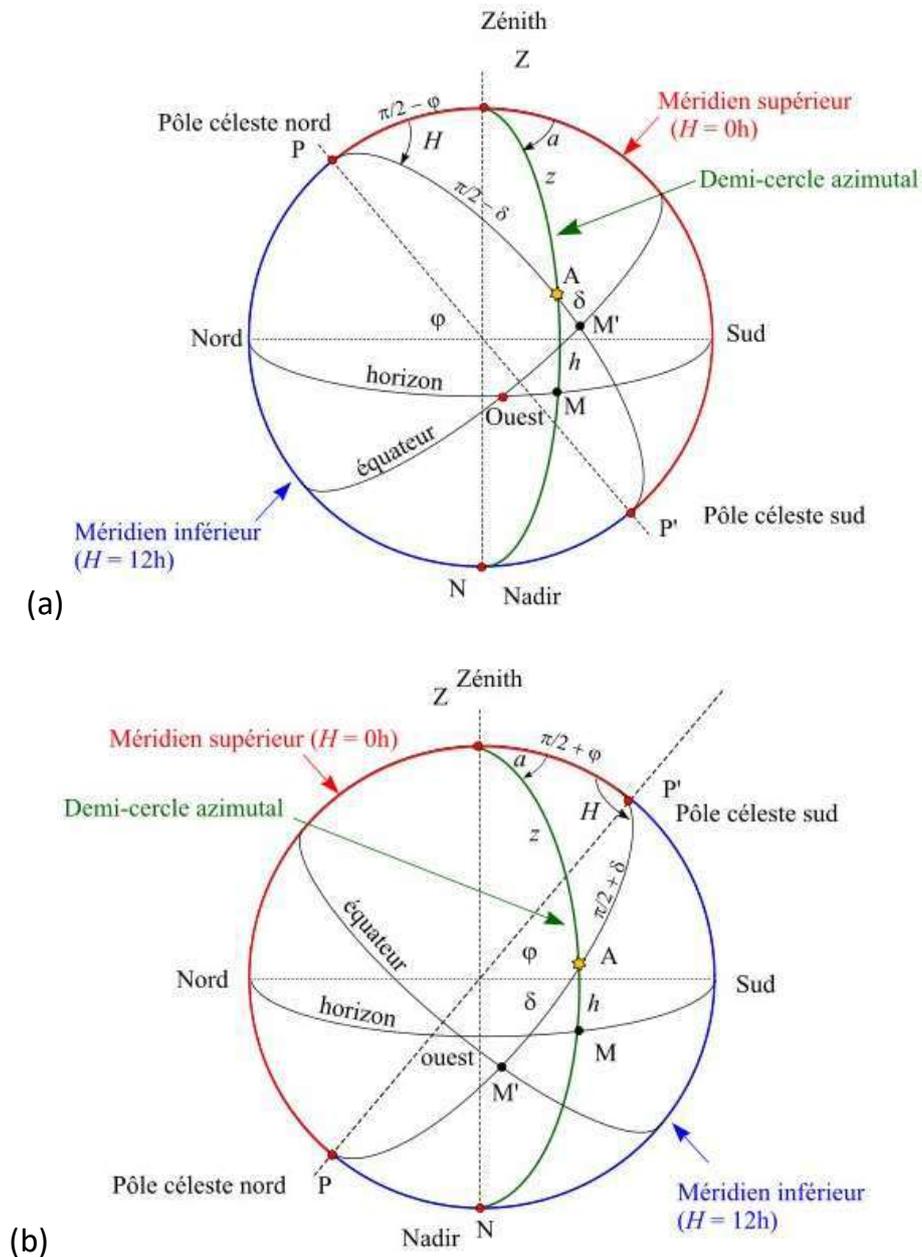


Figure 2.7 : Sphère locale dans l'hémisphère : (a) nord, (b) sud [40]

2.3.1.1. La latitude de lieu

La latitude φ est par définition l'angle formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu considéré. Elle est quantifiée par degrés, de 0° à 90° de part et d'autre de

l'équateur, ce qui donne la latitude Nord et la latitude Sud. L'équateur est la ligne de la latitude 0° [41].

2.3.1.2. La longitude de lieu

La longitude, dont le symbole est λ , est une autre coordonnée angulaire définissant la position d'un point à la surface de la terre. Elle représente l'angle formé par le plan méridien du lieu et le plan méridien origine. Ce dernier passe par l'observatoire de Greenwich et a pour longitude 0° [41].

2.3.1.3. L'angle de déclinaison

Cet angle varie selon les saisons en raison de l'inclinaison de la terre sur son axe de rotation et de la rotation de la terre autour du soleil. Si la terre n'était pas inclinée sur son axe de rotation, la déclinaison serait toujours de 0°. Sa valeur varie entre - 23°7' (au solstice d'hiver) et +23°7' (au solstice d'été) et s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne [41].

$$d = \arcsin \left[0.389 \sin \left[\frac{360}{365} (N - 82) + 2 \sin \left(\frac{360}{365} (N - 2) \right) \right] \right] \quad (2.1)$$

N : le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.

2.3.1.4. L'angle horaire

L'angle horaire est un paramètre qui décrit la différence entre le temps solaire local et le midi solaire. Bien qu'il soit calculé directement à partir des mesures du temps, il est exprimé en unités angulaires (degrés). L'angle horaire mesure le temps après-midi solaire à raison d'un degré toutes les quatre minutes, soit quinze degrés par heure. Le temps d'après-midi solaire est exprimé par un angle horaire positif, et le temps avant midi solaire par un angle horaire négatif. Par conséquent, deux heures avant midi solaire, l'angle horaire est de -30 degrés, et deux heures après midi solaire, il est de +30 degrés.

$$H = 15 (TSV - 12) \quad (2.2)$$

$$TSV = TL - DE + \left(\frac{Et + 4\lambda}{60} \right) \quad (2.3)$$

$$Et = 9.87 \sin\left(\frac{720}{365}(N - 82)\right) - 7.53 \cos\left(\frac{360}{365}(N - 82)\right) - 1.5 \sin\left(\frac{360}{365}(N - 82)\right) \quad (2.4)$$

TSV : est par définition le temps solaire vrai, égale au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude référence.

La valeur de l'angle horaire H égale à 0° à midi, 90° à 18 heures et -90° à 6 heures en heure solaire vrai.

DE : représente le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich (égale 1 pour l'Algérie).

TL : le temps légal, celui donné par une montre.

Et : correction de l'équation du temps.

2.3.1.5. Hauteur du soleil

Comme il est indiqué dans la figure 2.8, c'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Le soleil culmine à 46.56° d'altitude en hiver et à 93.44° d'altitude en été. L'élévation du soleil au lever ou au coucher du soleil est toujours de 0°. L'élévation du soleil à midi sur l'équateur à l'équinoxe est de 90°.

$$\sin(h) = \cos(d) \cos(\varphi) \cos(H) + \sin(\varphi) \sin(d) \quad (2.5)$$

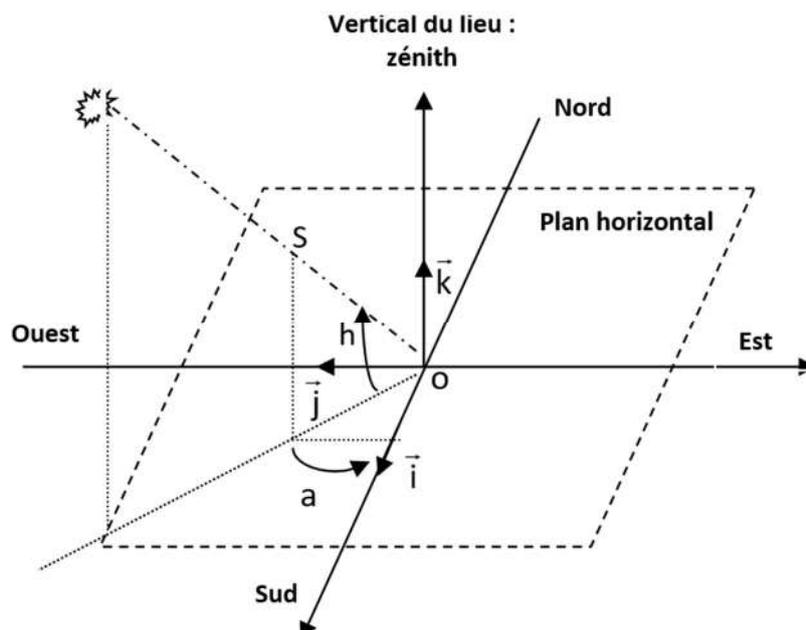


Figure 2.8 : Schéma descriptif du repère horizontal [42]

2.3.1.6. Azimut du soleil

L'angle d'azimut solaire (α) est l'angle entre la projection des rayons du soleil et une ligne plein sud ou plein nord [42].

$$\sin(\alpha) = \frac{\cos(d) \sin(H)}{\cos(h)} \quad (2.6)$$

2.3.1.7. Orientation d'un plan

En principe, les modules solaires peuvent être orientés dans toutes les directions. L'inclinaison du plan est définie comme l'angle entre le plan et l'horizontale. Les orientations les plus courantes sont le sud et l'est-ouest. Le soleil étant à son maximum au sud, il est logique de positionner les modules dans cette direction. Les modules PV orientés vers le sud atteignent leurs valeurs maximales à la mi-journée.

Dans l'hémisphère nord, l'azimut du plan est défini comme l'angle entre le sud et le plan du collecteur. Cet angle est considéré comme négatif vers l'est, c'est-à-dire qu'il va dans le sens anti-trigonométrique (voir tableau 2.2).

Tableau 2.2 : Les valeurs de l'azimut du plan en fonction des différentes directions

Orientation	Nord	Nord-Est	Est	Sud-Est	Sud	Sud-Ouest	Ouest	Nord-Ouest
Azimuth (°)	180	- 135	- 90	- 45	0	45	90	135
	- 180	225	270	315	360	- 315	- 270	- 225

2.3.1.8. Angle d'incidence sur un plan

En physique, l'angle d'incidence peut être représenté comme l'angle formé entre un rayon se propageant sur une surface et la ligne normale au point d'apparition sur la même surface.

Plus précisément, l'angle d'incidence, en optique géométrique, est l'angle entre un rayon incident sur une surface et la ligne perpendiculaire (à un angle de 90 degrés) à la surface au point d'incidence, appelée la normale. Le rayon peut être formé par n'importe quelle onde, comme les ondes optiques, acoustiques, micro-ondes et les rayons X. Pour les rayons solaires, il est donné par les équations suivantes [42] :

En se basant sur les coordonnées horizontales :

$$i = \text{acos}(\sin(\alpha - a) \cos(\gamma) \cos(h) - \sin(\gamma) \sin(h)) \quad (2.7)$$

En se basant sur les coordonnées horaires

$$\begin{aligned} i = & \text{acos}(\sin(\alpha) \cos(\gamma) \sin(H) \cos(d) \\ & + \cos(\alpha) \cos(\gamma) (\cos(H) \cos(d) \sin(\varphi) - \sin(d) \cos(\varphi)) \\ & + \sin(\gamma) (\cos(H) \cos(d) \cos(\varphi) - \sin(d) \sin(\varphi))) \end{aligned} \quad (2.8)$$

2.3.2. Modèle de Capderou & Cas d'un ciel clair

En 1987, Capderou a proposé un modèle mathématique permettant de calculer le rayonnement direct et diffus incident sur un plan horizontal. Il s'est basé sur le calcul du facteur de trouble atmosphérique. Ce facteur de perturbation atmosphérique prend en compte et comprend le fond atmosphérique, la réfraction, la turbulence et la diffusion des aérosols.

Le facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair peut être déterminé en utilisant l'équation suivante [43] :

$$T_L^* = T_0 + T_1 + T_2 \quad (2.9)$$

T_0 est le facteur de turbidité due à l'absorption gazeuse par la vapeur d'eau, qui est donné par l'expression :

$$\begin{aligned} T_0 = & 2.4 - 0.9 \sin(\varphi) + 0.1 (2 + \sin(\varphi)) \sin\left(\frac{360}{365}(j - 121)\right) - 0.2 z \\ & - \left(1.22 + 0.14 \sin\left(\frac{360}{365}(j - 121)\right)\right) (1 - \sin(h)) \end{aligned} \quad (2.10)$$

z représente l'altitude de lieu.

T_1 est le facteur de trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O_2 , CO_2 , et O_3) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh.

$$T_1 = 0.89^z \quad (2.11)$$

T_2 est le facteur de trouble dû à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption. Il en fonction, à la fois de la nature et de la quantité des aérosols. L'expression de ce facteur dépend du coefficient de trouble d'Angstrom β .

$$T_2 = \left(0.9 - 0.4 \sin\left(\frac{360}{365}(j - 121)\right)\right) 0.63^z \quad (2.12)$$

2.3.2.1. Eclairage solaire sur un plan horizontal

L'éclairage solaire direct sur un plan horizontal est calculé par l'équation ci-dessous [43] :

$$I_{\text{hor}} = I_0 \sin(h) C_{t-s} e^{-T_L^* \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89^z} \sin(h)\right)^{-1}} \quad (2.13)$$

I_0 est la constante solaire, sa valeur retenue est de 1367 W/m². Mais vu que la distance terre-soleil est variable, la nouvelle ou la constante solaire corrigée retenue est définie par le produit multiplicatif $I_0 C_{t-s}$ avec:

$$C_{t-s} = 1 + 0.034 \cos\left(\frac{360}{365}(j - 2)\right) \quad (2.14)$$

L'éclairage diffus observé sur une surface horizontale dépend de la valeur du facteur de turbidité de Linke et de l'angle d'élévation du soleil.

$$D_{\text{hor}} = I_0 C_{t-s} e^{-1+1.06 \log(\sin(h))} + 1.1 - \sqrt{1.21 + b^2} \quad (2.15)$$

$$b = \log(T_L^* - T_0) - 2.8 + 1.02 (1 - \sin(h))^2 \quad (2.16)$$

L'éclairage solaire globale est par définition la somme de ses deux composants, le direct et le diffus :

$$G_{\text{hor}} = I_{\text{hor}} + D_{\text{hor}} \quad (2.17)$$

2.3.2.2. Eclairage solaire sur un plan d'inclinaison et d'orientation quelconque

2.3.2.2.1. L'éclairage direct

Cet éclairage est la projection de la composante normale sur un plan incliné [43].

$$I_{\text{inc}} = I_{\text{nor}} \cos(i) = I_0 \cos(i) C_{t-s} e^{-T_L^* \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89^z} \sin(h)\right)^{-1}} \quad (2.18)$$

I_{nor} représente l'éclairage solaire direct à incidence normale.

2.3.2.2.2. L'éclairage solaire diffus

Il définit est le rayonnement solaire qui atteint le sol et qui a été dispersé par un composant atmosphérique tel que les molécules d'air, la poussière ou les nuages. Il est composé de trois parties :

- La composante circumsolaire

L'ampleur du rayonnement circumsolaire et sa distribution autour du disque solaire dépendent fortement des composantes atmosphériques, qui varient d'un endroit à l'autre et dans le temps [44]. Par conséquent, la détermination du rayonnement circumsolaire est très importante pour modéliser les systèmes photovoltaïques et éviter les erreurs dans l'estimation de leur production d'énergie. Elle peut être considérée qu'elle provient directement du soleil ou de son voisinage selon un cône de demi-angle d'un sommet compris entre 3° et 15° [43].

$$\delta_d = I_0 C_{t-s} e^{-2.48+\sin(h)+a-\sqrt{aa^2+4 bb^2}} \quad (2.19)$$

$$aa = 3.1 - 0.4 bb \quad (2.20)$$

$$bb = \log(T_L^* - T_0) - 2.28 - 0.5 \log(\sin(h)) \quad (2.21)$$

- La composante isotrope

Elle correspond à un ciel de luminance uniforme, son expression est définie par l'équation suivante [43] :

$$\delta_i = D_{hor} - \delta_d \sin(h) \quad (2.22)$$

- La composante du cercle de l'horizon

Cette composante provient d'une bande d'horizon d'une hauteur de 6°. Elle est associée à une accumulation d'aérosols dans les basses couches atmosphériques [43].

$$\delta_h = I_0 C_{t-s} \frac{-0.02 aaa}{aaa^2 + aaa bbb + 1.8} e^{\sin(h)} \quad (2.23)$$

$$aaa = \log(T_L^* - T_0) - 3.1 - \log(\sin(h)) \quad (2.24)$$

$$bbb = e^{0.2+1.75 \log(\sin(h))} \quad (2.25)$$

En effet, l'éclairement diffus incident en provenance du ciel est donné par la formule suivante [43] :

$$d_{ciel} = \delta_d \cos(i) + \delta_i \frac{1 + \sin(90 - \beta)}{2} + \delta_h \cos(90 - \beta) \quad (2.26)$$

β défini l'inclinaison du plan d'incidence

L'éclairement diffus du sol est en fonction de son albédo qui révèle la réflexion du flux solaire incident [43] :

$$d_{sol} = \rho G_{hor} \frac{1 - \sin(90 - \beta)}{2} \quad (2.27)$$

ρ représente l'albédo du sol

L'éclairement diffus rétrodiffusé est celui qui est rediffusé à nouveau par le ciel vers le sol. Selon Capderou, il s'exprime selon la forme suivante [43] :

$$d_{r\acute{e}tr} = 0.9 (\rho - 0.2) G_{hor} e^{-\frac{4}{\sqrt{T_L^* - T_0}}} \quad (2.28)$$

L'éclairement solaire diffus incident sur un plan incliné est donné par l'équation suivante [43] :

$$D_{inc} = d_{ciel} + d_{sol} + d_{r\acute{e}tr} \frac{1 + \sin(90 - \beta)}{2} \quad (2.29)$$

D'où l'éclairement solaire global incliné à un instant donné est le suivant [43] :

$$G_{inc} = I_{inc} + D_{inc} \quad (2.30)$$

2.4. Concepts solaires à considérer dans un système photovoltaïque

L'installation des modules photovoltaïques doit tenir en considération certains concepts pour tirer pleinement parti du rayonnement solaire : l'orientation, l'inclinaison, la latitude du lieu, les conditions climatiques et l'effet des ombres entre les panneaux PV.

2.4.1. Principe général du montage

Des obstacles comme des arbres ou des bâtiments peuvent affecter l'ensoleillement. Il est important de faire appel à un professionnel pour une installation optimale.

Donc, certains obstacles peuvent être présents et peuvent porter de l'ombre sur les panneaux photovoltaïques. La distance nécessaire à respecter peut être déduite directement du schéma géométrique donné par la figure 2.9.

L'entre-axe entre les deux rangées est défini comme suit [46] :

$$\text{Entre-axe} = d + b = h \left(\cos(\beta) + \frac{\sin(\beta)}{\text{tg}(\alpha)} \right) \quad (2.30)$$

h la dimension du capteur (m)

α la hauteur solaire minimale (en degrés, couramment prise le 21 décembre)

β est l'inclinaison du capteur (degrés)

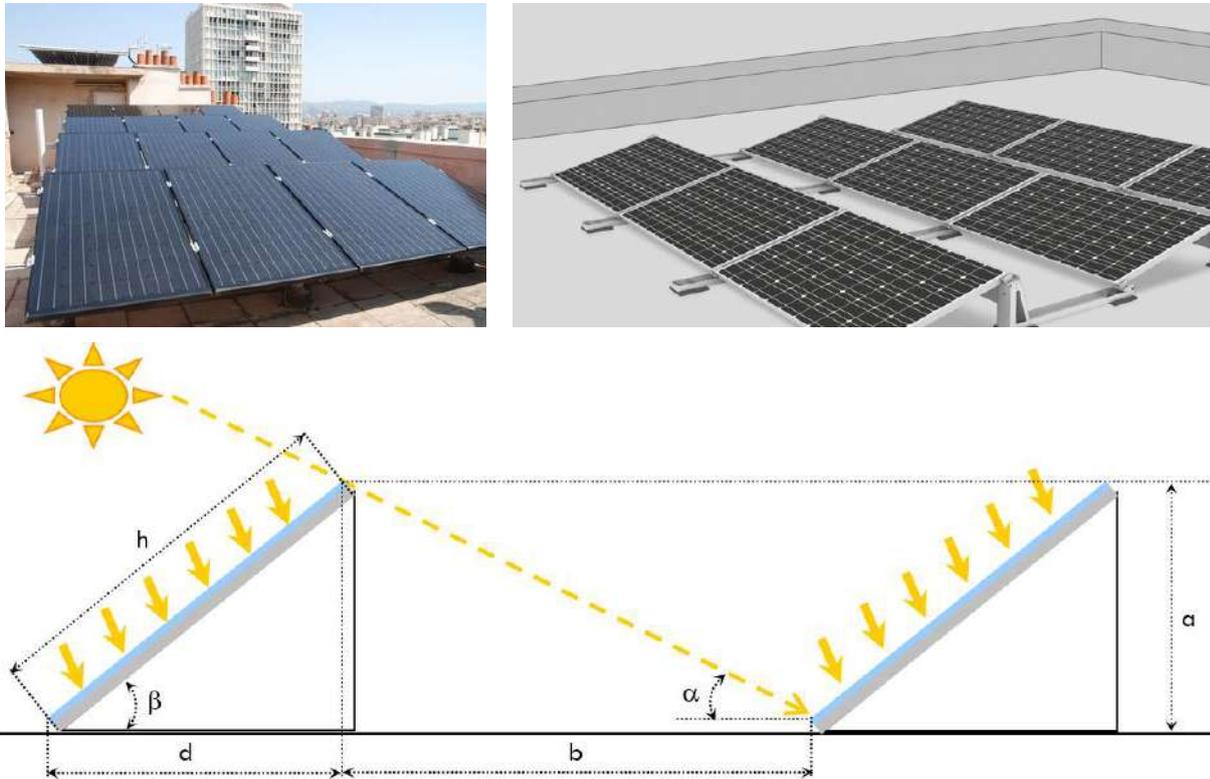


Figure 2.9 : Distance requise pour éviter tout type d'obstacle [45]

Idéalement, les modules photovoltaïques ne doivent pas être ombragés entre 9 heures et 15 heures le 21 décembre, le jour le plus court de l'année, afin de maximiser la production.

2.4.2. L'orientation idéale

L'orientation idéale peut varier légèrement selon la région et l'installation. L'orientation idéale pour un système photovoltaïque est inclinée et orientée vers le sud, ce qui signifie que les vents dominants du nord frappent les panneaux sur cette grande surface, ce qui peut entraîner le renversement, l'envol ou le déplacement des panneaux.

Chaque localité a des caractéristiques de charge de vent différentes et il convient d'utiliser le bon type de structure et les solutions d'ancrage supplémentaires afin de garantir que l'ensemble du système peut résister à des fortes vitesses. Le fabricant de

la structure doit être en mesure de fournir des études de charge de vent avec un plan de lestage recommandé, une certification de la conception et des garanties.

2.4.3. L'inclinaison optimale

Afin de bénéficier de l'énergie solaire, qui est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus importantes, avec la plus grande efficacité, différents paramètres doivent être optimisés. Une étude a mis l'accent sur l'optimisation de l'angle du panneau photovoltaïque en utilisant les valeurs du rayonnement solaire incident sur le plan horizontal selon l'orientation sud [47].

Cependant, cette partie vise à fournir une énergie maximale d'origine solaire en déterminant les angles optimaux du panneau PV sur une base mensuelle, saisonnière et annuelle pour le panneau PV sur le plan incliné. Dans ce contexte, l'équation de l'angle d'inclinaison optimale est donnée par l'expression donnée ci-dessous [42] :

$$\beta_{opt} = \varphi - d \quad (2.31)$$

En plus de l'équation 2.1, une autre approche peut être proposée pour calculer la déclinaison du soleil.

$$d = \frac{0.33 - 22.18 \cos(0.984 j) - 0.35 \cos(1.968 j) - 0.14 \cos(2.952 j)}{+3.787 \sin(0.984 j) + 0.032 \sin(1.968 j) + 0.072 \sin(2.952 j)} \quad (2.32)$$

2.5. Le climat et les données radiométrique de Ghardaïa

La région de Ghardaïa est une région située dans le Sahara septentrional caractérisé par un climat chaud et sec en été et froid en hiver. L'altitude de Ghardaïa est de 503m au-dessus du niveau de la mer, sa Latitude : 32°29'27'' Nord, et sa Longitude : 3°40'24'' Est.

Les informations (base de données) qui y figurent révèlent une période qui s'étend du 01 Janvier 2004 au 31 Décembre 2015. Elles correspondent à une année typique formée de 12 mois typiques. Les chiffres indiquent que le climat est désertique avec des hivers doux et très froids la nuit et des étés très chauds et ensoleillés. L'état du ciel est clair au cours d'une bonne partie de l'année, mais les vents sont parfois fréquents. Le 20 Décembre 2004, l'air était très humide et parfois saturé (l'humidité

relative = 100%) en vapeur d'eau. Ce phénomène est classiquement lié et causé principalement par le risque des nuages, la pluie, le brouillard, la rosée ou le givre.

La durée du jour à Ghardaïa varie considérablement au cours de l'année. Le jour le plus court est le 21 décembre avec une durée d'insolation d'environ 10 heures et 1 minute, par ailleurs, le jour le plus long est celui du 21 juin avec une durée d'environ 14 heures et 06 minutes. A Ghardaïa, l'indice de clarté a sensiblement varié selon les mois. Le mois le plus clair de l'année où le ciel est généralement dégagé est celui d'Août. La période la plus claire de l'année dure presque trois mois et commence généralement au début du mois de juin. Le mois le plus nuageux de l'année durant lequel le ciel est généralement couvert ou nuageux environ 79.47% du temps est celui d'Octobre. Le taux de clarté annuel est très élevé, estimé à 88.87%.

À l'issue de ces données, il était possible de déterminer les jours type de chaque mois, les indices de clartés mensuels et annuels correspondants et autres paramètres climatiques. Dans notre cas, et conformément au tableau 2.3, on s'intéresse uniquement aux jours type, aux inclinaisons optimales mensuelles déterminées par les équations 2.31 et 2.32 et les irradiances solaires mesurées (réelles) comparées avec celles calculées par le modèle de Capderou pour un ciel totalement clair.

L'irradiation solaire est une mesure d'énergie par unité de surface (densité d'énergie de surface), en wattheure par mètre carré (Wh/m^2), reçue du soleil sous forme de rayonnement électromagnétique. Elle se calcule en effectuant l'intégrale de l'éclairement solaire instantané (W/m^2) du lever au coucher du soleil, ou bien en multipliant la valeur moyenne journalière (pendant 24 heures) de l'éclairement solaire instantané par 24. L'éclairement solaire est estimé par l'approche de Capderou Dédié à l'Algérie et valable pour un ciel totalement clair.

Les figures 2.10 et 2.11 donnent un exemple indicatif permettant de tracer d'abord les courbes des éclairements solaires instantanés correspondants à la journée du 16 septembre (jour type) avec l'indication des valeurs des irradiances solaires.

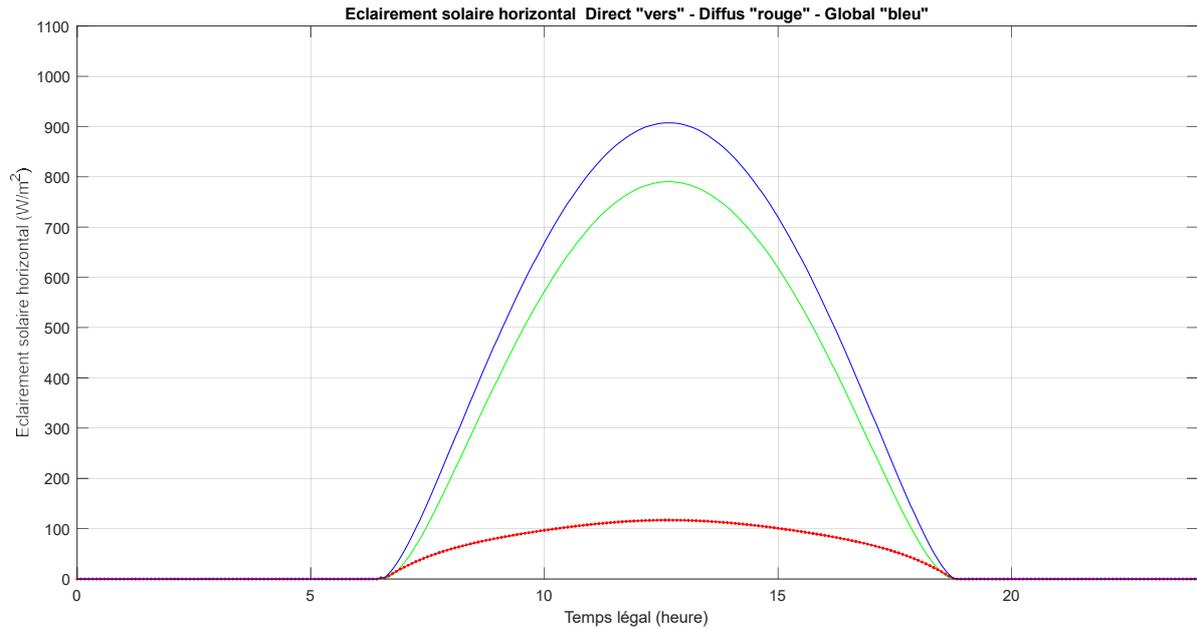


Figure 2.10 : Éclairements solaires instantanés incidents sur un capteur horizontal correspondants à la journée 16 septembre. Irradiation journalière = 6592.37 Wh/m^2

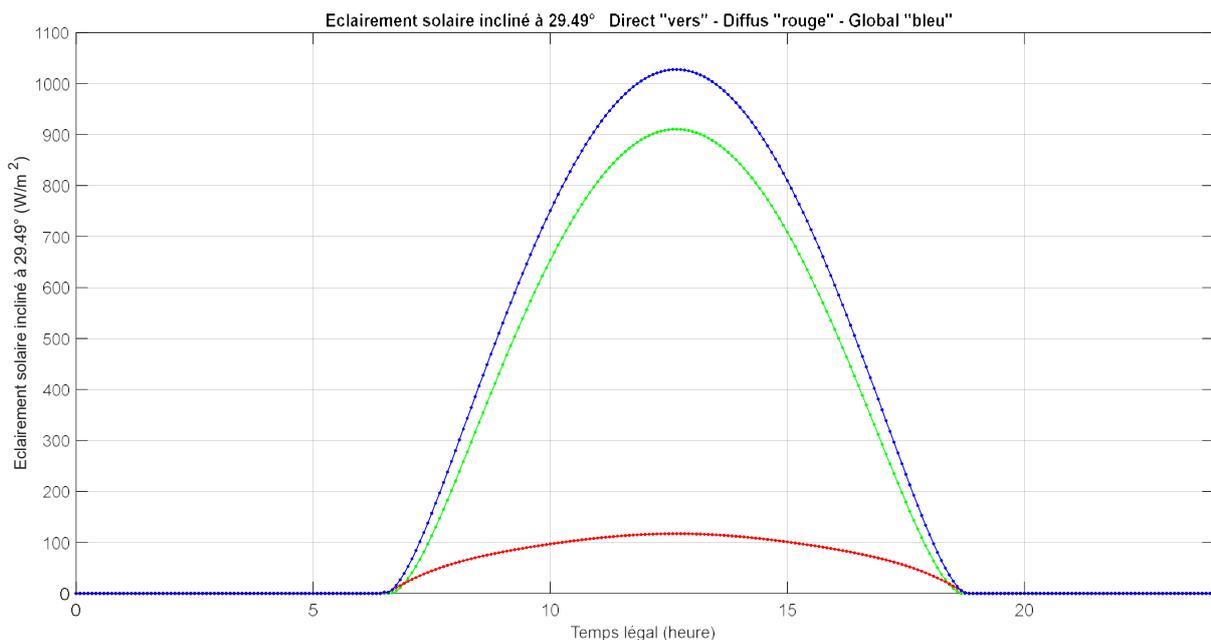


Figure 2.11 : Éclairements solaires instantanés incidents sur un capteur incliné à 29.49° correspondants à la journée 16 septembre. Irradiation journalière = 7374.8 Wh/m^2

D'autre part, l'élaboration des cartes du rayonnement solaire pour différentes inclinaisons consiste à créer des illustrations révélant la distribution géographique du rayonnement solaire dans une région donnée.

Tableau 2.3 : Irradiations solaires mesurées (réelles) et calculées (par kWh/m²) incidentes sur un capteur horizontal et un plan d'inclinaison optimale mensuelle, orienté au sud

Mois	Jour type	Inclinaison optimale mensuelle	Cas d'un ciel clair & Modèle de Capderou		Valeurs réelles & Cas réels	
			Irs horizontales	Irs inclinées	Irs horizontales	Irs inclinées
Janvier	5	52.43	3.9764	7.0872	3.3401	6.6124
Février	8	44.83	4.9865	7.5144	4.3881	6.6126
Mars	15	34.22	6.5394	7.8236	5.4277	6.4935
Avril	19	23.02	7.7482	8.0277	6.7409	6.9840
Mai	20	14.24	8.2817	8.2200	7.2878	7.2980
Juin	07	10.01	8.3715	8.2932	7.7854	7.7126
Juillet	21	11.89	8.0526	8.0255	7.6499	7.6242
Août	25	19.10	7.2790	7.6055	6.9878	7.3012
Septembre	16	29.49	6.5558	7.3655	5.7035	6.4079
Octobre	30	40.70	4.8620	6.9967	4.5216	6.5069
Novembre	26	50.04	4.0750	6.9193	3.5045	5.9505
Décembre	28	54.60	3.8866	7.0612	3.0704	5.5783

Dans les figures 2.12-2.15, des cartes de rayonnement solaire montrent plus exactement les potentiels d'énergie solaire d'une région spécifique et fournissent des informations très utiles pour la sélection optimale du site d'un système d'énergie solaire en général.

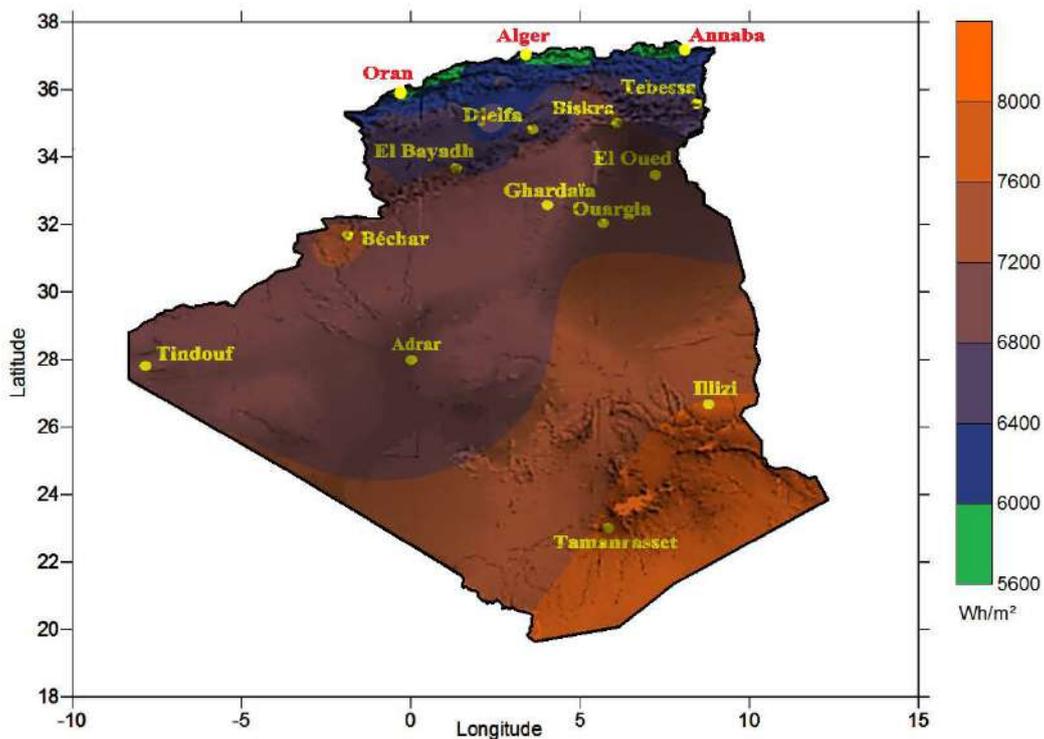


Figure 2.12 : L'irradiation globale annuelle moyenne inclinée à latitude du lieu [35, 36]

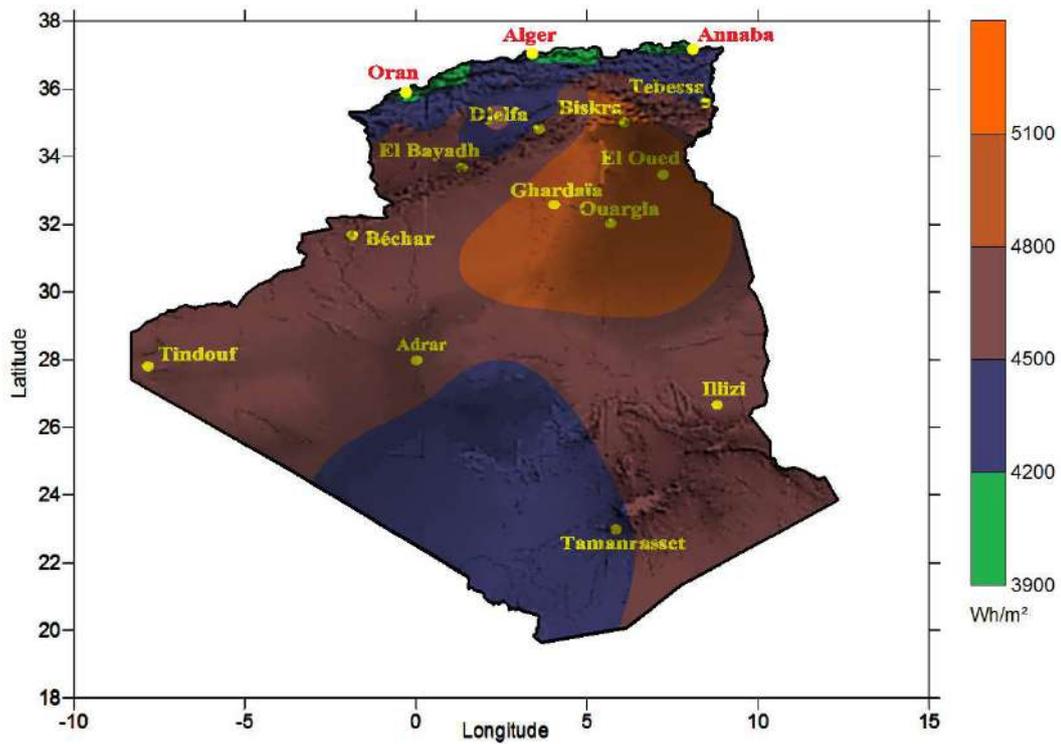


Figure 2.13 : L'irradiation globale annuelle moyenne reçue sur un plan vertical sud [35, 36]

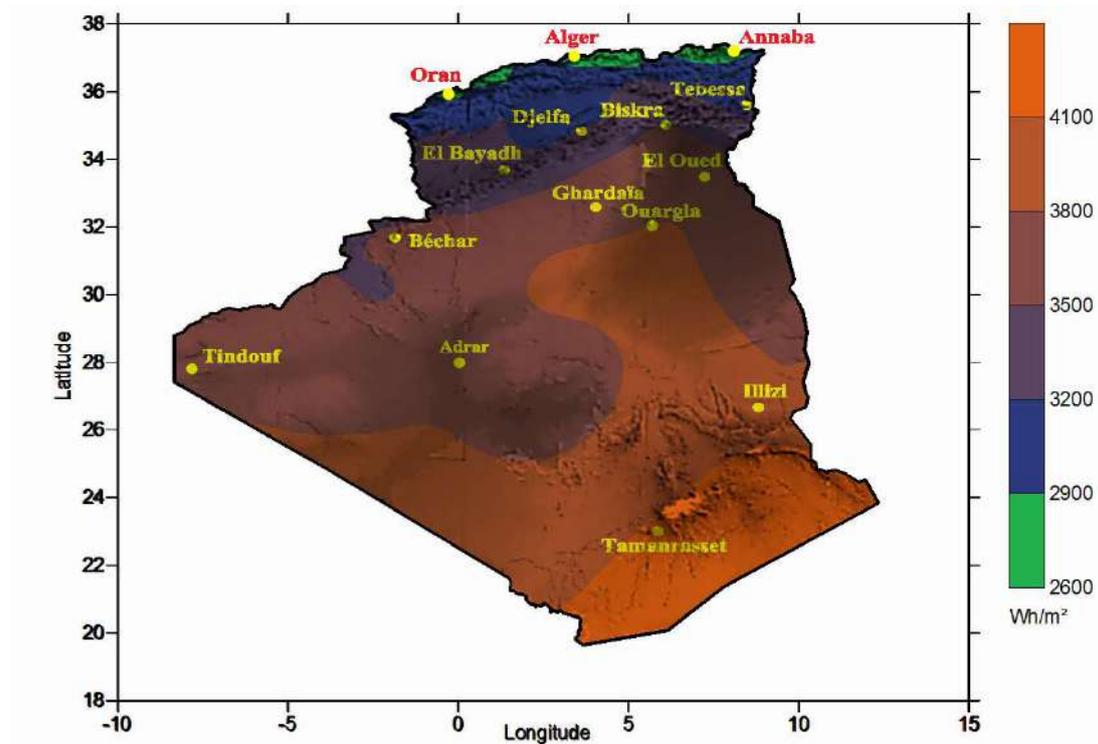


Figure 2.14 : L'irradiation globale annuelle moyenne reçue sur un plan vertical est/ouest [35, 36]

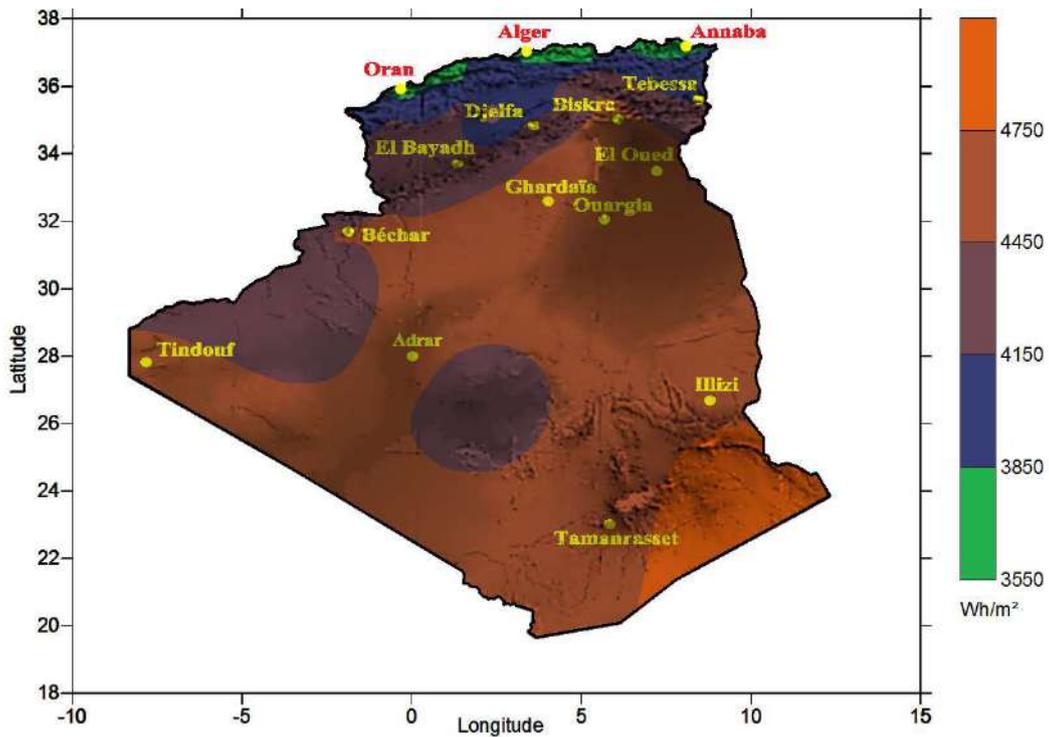


Figure 2.15 : L'irradiation globale annuelle moyenne reçue sur un plan vertical sud-est / sud-ouest [35, 36]

2.6. Dimensionnement des systèmes photovoltaïques autonomes

Un système photovoltaïque autonome avec batterie d'accumulateurs est un système de production d'énergie électrique indépendant non relié à un réseau public de distribution d'électricité. Il comprend les composants de base indiqués dans le schéma de la figure 2.16.

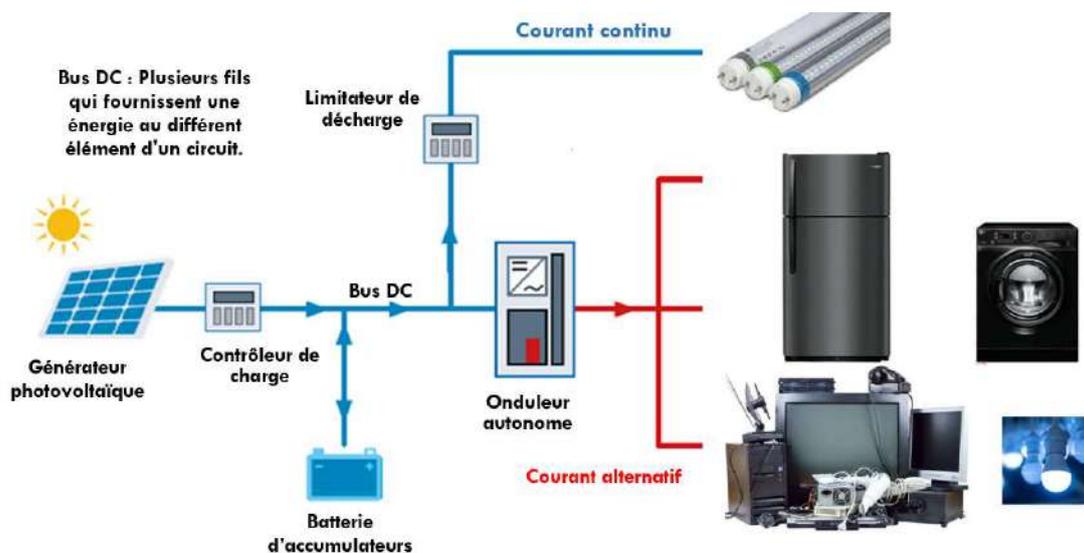


Figure 2.16 : Schéma de principe du système photovoltaïque autonome avec stockage

Dans la plupart des cas, ce système est utilisé dans des sites isolés. La principale différence avec un système photovoltaïque standard (connecté au réseau) est la présence de batteries. Il se compose principalement des éléments suivants :

- Un générateur photovoltaïque constitué d'une association série/parallèle de modules photovoltaïques
- Un système de régulation (régulateur de charge)
- Un système de conversion DC/AC (onduleur)
- Un système de stockage électrochimique (batteries)

L'étude de dimensionnement est toujours confrontée à deux critères essentiels qui sont le gisement solaire et la demande énergétique.

Dans cette étude, le dimensionnement du système tout entier s'articule sur la détermination de la puissance, l'énergie consommée, l'énergie produite par les panneaux en ajoutant 30% de l'énergie à consommer, la tension du travail, le nombre de batteries dont on va avoir besoin avec leurs capacités et les références du régulateur et de l'onduleur.

La tension de fonctionnement recommandée pour le système photovoltaïque $U_{\text{système}}$ retenue sera déterminée en fonction de la somme des puissances des équipements électriques. Elle sera :

- a. 12V si la puissance totale est inférieure à 1000W
- b. 24V si la puissance totale est comprise entre 1000 et 2000W
- c. 48V si la puissance totale est supérieure à 2000W

Ce que vient d'abord à l'esprit c'est de déterminer avec quels types de batteries à utiliser pour pouvoir stocker l'énergie, la restituer et l'exploiter. Le système de stockage électrique nécessite de prêter attention à la capacité du parc de batteries (Ah), qui est calculée selon l'équation ci-dessous [48] :

$$C_{\text{Stockage}} = \frac{\text{Énergie produite} \times \text{Nombre de jours d'autonomie}}{\text{Profondeur de décharge} \times U_{\text{système}}} \quad (2.33)$$

L'autonomie de fonctionnement des batteries dépend de la région et de l'ensoleillement disponible (en jours). L'autonomie grâce aux batteries solaires dépend

de deux facteurs clé : la capacité de la batterie et la consommation électrique de la maison. Plus la capacité de la batterie est importante, plus on peut stocker de l'énergie solaire, ce qui permet d'être autonome pendant une période plus longue. Pour notre cas, la valeur retenue est de 3 jours. Les systèmes de batteries solaires pour les particuliers ont dans l'ensemble une durée de vie de 5 à 15 ans.

La profondeur de décharge est par définition la fraction ou le pourcentage de la capacité qui a été retirée d'une batterie complètement chargée. Pour notre étude, la valeur retenue est 0.7 **[48-50]** :

$$\text{Nombre de batteries} = \frac{C_{\text{Stokage}}(\text{Ah})}{C_{\text{Stokage_batterie}}(\text{Ah})} \quad (2.34)$$

$C_{\text{Stokage_batterie}}$: Capacité du stockage d'une seule batterie (Ah).

La formule pour déterminer le nombre de batteries en série dans une rangée est la suivante **[48-50]** :

$$\text{Nombre de batteries en série} = \frac{U_{\text{Système}}(\text{V})}{U_{b_{nm}}(\text{V})} \quad (2.35)$$

$U_{b_{nm}}$ est la tension nominale de la batterie.

Il est à noter que la capacité du stockage des batteries ne s'ajoute pas si ces derniers sont en série.

L'étape suivante consiste à déterminer la puissance crête équivalente de l'installation photovoltaïque toute entière **[48-50]**.

$$P_{\text{Crête}} = \frac{E_{\text{Produite}}}{I_r} \quad (2.36)$$

I_r est le coefficient d'irradiation solaire, la valeur retenue dans cette étude pour le site de Ghardaïa est de 4.8 kWh/m².

L'énergie produite (Wh) par le système photovoltaïque est considérée comme étant la somme de la charge électrique (l'énergie consommée) et 30% de cette énergie. Une charge électrique est tout simplement un composant d'un circuit qui consomme de la puissance ou de l'énergie. Dans un cadre domestique, les exemples les plus évidents de charges électriques sont les ampoules électriques et les appareils électroménagers.

$$\text{Nombre de modules photovoltaïques} = \frac{P_{\text{Système Photovoltaïque}} (Wc)}{P_{\text{Crête du module photovoltaïque}} (Wc)} \quad (2.37)$$

Le nombre de modules en série dans la rangée est exprimé comme suit **[48-50]**:

$$\text{Nombre de modules photovoltaïques en série} = \frac{U_{\text{Système}}(V)}{U_{m_{nm}}(V)} \quad (2.38)$$

$U_{m_{nm}}$: représente la tension nominale du module photovoltaïque qui sera déterminée en fonction de la tension en circuit ouvert V_{oc} **[49]** :

- ✓ Elle est de 12V si V_{oc} est compris entre 19 et 29V.
- ✓ Si la tension V_{oc} est comprise entre 29 et 43 V, la valeur de la tension nominale du module photovoltaïque est 24V
- ✓ Pour une tension V_{oc} supérieure à 43 V, la tension nominale est de 48V

Le nombre de rangées de modules photovoltaïques est calculé par l'équation 2.39 **[48-50]** :

$$\text{Nombre de rangées photovoltaïques} = \frac{\text{Nombre de modules photovoltaïques}}{\text{Nombre de modules PVs en série}} \quad (2.39)$$

Le régulateur de charge constitue le cœur du système photovoltaïque. Il est chargé de surveiller et de protéger les batteries. Il a donc deux fonctions principales : protéger les batteries contre les surcharges et les décharges profondes et maximiser le transfert d'énergie du générateur photovoltaïque vers la charge. En analysant la taille du champ photovoltaïque et la tension de fonctionnement du parc de batteries, la capacité du régulateur de charge peut être déterminée selon l'équation suivante **[48-50]** :

$$\text{Nombre de rangées photovoltaïques} = \frac{P_{\text{Système Photovoltaïque}} (Wc)}{U_{\text{Système}}(V)} \quad (2.40)$$

Les valeurs maximales du courant I_{cc} et de la tension V_{oc} produites par les modules photovoltaïques sont connues pour déterminer la capacité du régulateur de charge.

$$I_{cc} = I_{cc - \text{Module PV}} \text{ Nombre de rangées photovoltaïques} \quad (2.41)$$

$$V_{oc} = V_{oc - \text{Module PV}} \text{ Nombre de modules PVs en série} \quad (2.42)$$

Par ailleurs, le choix de l'onduleur se base d'abord sur la puissance minimale définie par la puissance produite et ensuite la puissance de démarrage du système qui

est généralement 3 à 4 fois la puissance de fonctionnement instantanée. La fiche technique de l'onduleur doit inclure la puissance minimale et de démarrage. Selon les standards, on peut trouver des onduleurs de 10kW, 12kW... Selon la littérature, la puissance de l'onduleur doit être comprise entre 80% et 120% de la puissance crête des panneaux.

2.7. Dimensionnement d'un système PV autonome & Etude de cas

En résumé, le dimensionnement d'un système solaire photovoltaïque peut se faire en plusieurs étapes :

- Estimation de la charge
- Estimation du parc de batteries
- Estimation du nombre de panneaux photovoltaïques
- Choix judicieux du contrôleur de charge
- Calcul de la taille de l'onduleur
- Estimation du coût du système
- Câblage et estimation de la surface requise pour les panneaux photovoltaïques

Dans cet exemple, nous considérons que la consommation journalière dont on a besoin est égale à $P = 4000 \text{ Wh}$.

Il est à rappeler que le choix de la tension du travail dépend de la puissance instantanée. La tension de 12V est recommandée avec des puissances inférieures à 1000W. Pour des puissances entre 1000W et 2000W, la tension de travail recommandée est de 24V. Au-delà de 2000W, la tension de travail recommandée est de 48V. Pour notre cas, la mise en marche (en même temps) de l'ensemble d'équipements y compris le système d'éclairage entraîne une puissance record équivalente à une valeur de 5.2 kW. La puissance instantanée est bien souvent supérieure à 2000W, la tension du travail recommandée est donc 48V.

D'autre part, la capacité du banc de batteries par calcul est équivalente à 464.29 Ah. En fonction des batteries disponibles en marché, on peut sortir le nombre de batteries et leurs enchaînements. Le nombre de séries de batteries, c'est-à-dire, le nombre de rangées en parallèle, est donc défini par le rapport entre la capacité du

stockage des batteries et la capacité du stockage d'une seule batterie. Le nombre de batteries en série dans une seule rangée est par définition le rapport entre la tension globale du système et la tension d'une seule batterie. Pour ce cas il est de 4. Il est à noter aussi que la capacité du stockage des batteries ne s'ajoute pas si ces dernières sont en série. Le tableau 2.4 donne par millions de centimes le coût total du banc de batteries en prenant en considération les spécificités techniques et le coût de chaque batterie.

Tableau 2.4 : Coût total et choix judicieux du banc de batteries solaires en tenant en considération les caractéristiques et la marque & Cas des batteries solaires à GEL de marques "VICTRON étanche" et "Plomb Carbone - UNIBAT"

Tension nominale des batteries & Capacité des batteries	Coût d'une seule batterie (Dinars)	Nombre de batteries			Coût total du banc de batteries (Millions de centimes)
		Total	En série	En parallèle	
12V / 090Ah	46 676.80	24	4	6	112.02
12V / 110Ah	57 939.20	20	4	5	115.87
12V / 130Ah	67 892.80	16	4	4	108.63
12V / 165Ah	87 476.80	12	4	3	104.97
12V / 220Ah	107 060.80	12	4	3	128.47
12V / 265Ah	157 166.40	8	4	2	125.73
12V / 100Ah	57 440.00	20	4	5	114.88
12V / 150Ah	81 440.00	16	4	4	130.30
12V / 220Ah	110 240.00	12	4	3	132.29

L'exemple ci-présent indique que le choix le plus adéquat doit porter sur un banc de stockage de 12 batteries solaires à GEL de marque "Batterie VICTRON étanche Gel 1.98kWh" montées en 3 rangées parallèles de 4 batteries en série.

L'étape suivante consiste à déterminer la puissance crête équivalente de l'installation photovoltaïque. La puissance crête à installer du système photovoltaïque tout entier par calcul correspond à la valeur de 1083.33 Wc. Le tableau 2.5 donne par millions de centimes le coût total du générateur photovoltaïque en tenant en considération les spécificités techniques et le coût de chaque module.

Tableau 2.5 : Coût total et choix judicieux du générateur photovoltaïque en tenant en considération les caractéristiques et la marque des modules & Cas des panneaux solaires de type monocristallin de marques "VICTRON " et " UNISUN "

Tension nominale des modules Puissance nominale des modules	Courant à puissance maximale (A)	Coût d'un seul module PV (Dinars)	Nombre de modules PV			Puissance crête du système PV à installer	Coût total du générateur PV (Millions de centimes)
			Total	En série	En parallèle		
12 / 090Wc	4.59	19 422.40	12	4	3	1080	23.31
12 / 115Wc	6.04	20 105.60	12	4	3	1380	24.13
12 / 140Wc	7.22	24 968.00	8	4	2	1120	19.97
12 / 175Wc	9.03	29 376.00	8	4	2	1400	23.50
24 / 215Wc	5.75	43 248.00	8	2	4	1720	25.95
24 / 360Wc	9.38	57 286.40	4	2	2	1440	22.91
24 / 100Wc	2.81	26 400.00	12	2	6	1200	31.68
12 / 150Wc	8.43	29 600.00	8	4	2	1200	23.68
24 / 150Wc	4.20	34 400.00	8	2	3	1200	27.52
24 / 200Wc	5.62	39 200.00	6	2	3	1200	23.52

Le choix économique sera opté donc pour 8 panneaux monocristallins d'une puissance nominale de 140Wc et d'une tension de 12V. Le nombre de panneaux à installer par calcul correspond à la valeur de 7.738, le nombre de panneaux réel à installer sera un multiplicateur de 2. Le chiffre sera arrondi à 8. La puissance crête du générateur photovoltaïque convient à la valeur exacte de 1120Wc. Le générateur photovoltaïque sera composé de 2 rangées en parallèle constituées chacune de 4 panneaux en série.

Conformément à la configuration des batteries, on devra choisir donc un ou des régulateurs de 48V qui vont avoir au moins la puissance crête du système PV 1120Wc. Le MPPT possède un très bon rendement de conversion de 98%, fournissant un très bon rendement à l'installation.

On peut raccorder un régulateur de charge à chaque rangée de 4 batteries d'une puissance équivalente qui se détermine par le rapport entre la puissance crête totale du système PV et le nombre de rangées de 4 batteries. Si on divise 1120Wc par 3, on obtient 373.33Wc.

Le courant de charge minimale du régulateur pour une rangée est par définition le rapport de la puissance minimale de ce régulateur de charge pour la rangée et la tension de travail. Si on divise 373.33Wc par 48V, on obtient presque 7.78A. Donc, si nous

connectons en série un régulateur à chaque rangée de batteries (4 batteries en série), il devra être à un courant supérieur à 7.78A.

Mais si on utilise un seul régulateur pour tous le système, il faudra multiplier la puissance minimale d'un régulateur de charge pour une rangée par le nombre de rangées de batteries en parallèle à installer pour obtenir la puissance minimale du régulateur de charge du système tout entier. Elle est simplement équivalente à la puissance crête du générateur photovoltaïque (1120Wc).

Le courant de charge minimale pour le système tout entier est obtenu soit en multipliant le courant de charge minimale pour une rangée par le nombre de rangées de batteries en série à installer ou en divisant la puissance crête réelle de l'installation photovoltaïque par la tension du travail. Si nous connectons un régulateur de charge au banc de batteries, il devra être à un courant supérieur à 23.33A. En respectant ces paramètres techniques, le choix le plus favorable, financièrement, correspond aux spécifications techniques suivantes :

Référence du régulateur	Courant de charge maximale Tension nominale	Coût du régulateur de charge
VICTRON Blue Solar MPPT 100/30 (100V)	30A & 12 / 24V	35 904.00 Dinars

En ce qui concerne l'onduleur, sa puissance doit être comprise entre 80% et 120% de la puissance crête des panneaux. Pour ce système, l'intervalle le plus convenable correspond à une puissance comprise entre 896 et 1344 Watts.

Chapitre 2 : Dimensionnement et adaptation d'une installation photovoltaïque

Référence de l'onduleur	Protection des batteries recommandée	Puissance continue à 25°C / 40°C	Puissance de sortie à 25°C/40°C / 65°C	Tension et Fréquence de sortie	Coût de l'onduleur
Phoenix Inverter 48/2000 230V Smart Victron (48V / 2000VA)	Fusible 80A Section de câble batterie minimale : 25 mm ²	2000 VA 1600 W	1450 W 1000 W	210 – 245 V 50 Hz ou 60 Hz	145 416.00 Dinars
	Puissance de crête	Plage de tension d'alimentation	Rendement	Consommation à vide	
	4000 VA	37.2 - 68 V	Max 94 %	11 W	

2.8. Conclusion

En conclusion, le dimensionnement d'un système photovoltaïque nécessite une analyse approfondie des différents facteurs en jeu. Un dimensionnement adéquat est essentiel pour assurer le bon fonctionnement, l'efficacité énergétique et la rentabilité d'une installation photovoltaïque

Les travaux menés ont montré qu'il existe une multitude de systèmes solaires avec des capteurs photovoltaïques intégrés au bâtiment. L'enjeu en matière de recherche dans ce chapitre concerne les composants photovoltaïques. Il est préférable que les panneaux photovoltaïques soient inclinés de manière à maximiser le rendement des modules photovoltaïques.

Plusieurs devis estimatifs ont été adressés en retenant la configuration qui maximise les mesures de performance et correspond au meilleur prix. L'estimation la plus économe sera considérée pour la suite des travaux.

Malgré les nombreux avantages, l'installation d'un système photovoltaïque semble coûteuse. L'alimentation d'une maison en électricité grâce à l'énergie solaire photovoltaïque est une bonne idée mais, c'est surtout un investissement important qui peut faire peur.

Chapitre 3

Évaluation des Coûts et Rentabilité des Systèmes Photovoltaïques Autonomes

Chapitre 3 : Évaluation des Coûts et Rentabilité des Systèmes Photovoltaïques Autonomes

3.1. Introduction

Les systèmes photovoltaïques autonomes peuvent être déployés dans des zones où le réseau électrique conventionnel n'est pas disponible, fournissant ainsi de l'électricité aux personnes éloignées du réseau ou à celles qui souhaitent être indépendantes des entreprises d'électricité.

Mais les systèmes photovoltaïques, les plus simples et les moins coûteux sont conçus pour une utilisation diurne uniquement. Ces systèmes se composent de modules reliés directement à un appareil à courant continu, sans dispositif de stockage. Lorsque le soleil brille sur les modules, l'appareil consomme l'électricité qu'ils produisent.

Cependant, il existe également des inconvénients, tels que la dépendance aux conditions météorologiques, le coût initial, l'encombrement et la dépendance à l'égard de la lumière du soleil. Il est important de tenir compte des circonstances individuelles pour décider si un système photovoltaïque est le meilleur choix pour un propre approvisionnement en énergie. L'objectif principal de ce chapitre est de réaliser une analyse des coûts pour un système photovoltaïque autonome. En raison des différents calculs de coûts publiés à l'échelle internationale, nous appliquons des estimations réelles récentes dans l'analyse, basées sur les coûts des composants et l'examen de la durée de vie des composants, notamment les batteries solaires ou d'accumulateurs.

En Europe, la plupart des foyers constateront que les économies réalisées grâce aux panneaux solaires sont supérieures aux coûts, même si cela peut prendre quelques années, voire quelques dizaines d'années. Les systèmes solaires sont coûteux à installer mais, nécessitent peu d'entretien sur une durée de vie de 20 à 30 ans. Afin de promouvoir les systèmes photovoltaïques résidentiels, les effets de la consommation d'électricité et de la puissance maximale installée sur leur rentabilité ont été évalués dans ce travail. Ces dernières années, d'importants changements réglementaires ont

été introduits dans les domaines de l'autoconsommation et des tarifs de l'énergie. En outre, les prix de l'électricité au monde ont fortement augmenté, atteignant des niveaux record l'année dernière. Il est donc nécessaire de mener de nouvelles études afin d'obtenir une image précise de la rentabilité des systèmes de stockage d'énergie par batterie et des systèmes photovoltaïques. Cette contribution propose un outil de calcul simple pour aider à la conception optimale de ce type d'installations et avoir une idée précieuse sur la rentabilité financière de ce genre de système.

3.2. L'influence de la charge sur le coût total de l'installation

Les critères qui influent sur le coût du système photovoltaïque et leur rentabilité sont nombreux. Ils dépendent généralement de l'énergie requise (à consommer), la technologie, la marque sélectionnée, les spécificités techniques et la durée de vie des composants solaires, le mode de pose des panneaux solaires et la complexité du raccordement, le coût de l'électricité conventionnelle, la main d'œuvre et l'accompagnement, la maintenance, le suivi et la mise en place de mesures de prévention et de protection. La démarche adoptée dans ces travaux s'articule sur une méthode de sélection basée, à la fois, sur le coût des composants et ses caractéristiques techniques. L'objectif est d'optimiser le coût total de l'installation suite à un recensement récent réalisé au profit des principaux composants. Nous nous sommes inspirés d'une liste de coût convertis en dinar algérien des panneaux solaires monocristallin relatifs à des températures de fonctionnement comprises entre -40 et 85 °C, des régulateurs solaires MPPT, des batteries solaires et des onduleurs solaires. Nous retenons la configuration qui maximise les mesures de performance et correspond au meilleur prix. L'estimation la plus économe sera considérée.

Le coefficient d'irradiation solaire est de 4.8 kWh/m². L'autonomie de fonctionnement des batteries retenue est de 3 jours. Le taux de pertes est fixé à 0.3. Les tableaux 3.1-10 donnent des estimations financières relatives au système photovoltaïque en fonction de la charge choisie par le propriétaire. La tension recommandée du système

Chapitre 3 : Évaluation des coûts et rentabilité des systèmes photovoltaïques autonomes

est de 12V. Les calculs ont été achevés en utilisant le logiciel de programmation "Matlab R2016b".

Tableau 3.1 : Coûts du système PV ayant une charge journalière de 2.5 kWh

Batteries solaires									
Capacité du banc de batteries	Marque	Tension nominale & Capacité	Nombre de batteries		Coût				
			Nombre de rangées de batteries en parallèle	Nombre de batteries montées en série par rangée					
1160.71 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 1.08kWh	12V 90Ah	13	1	607 984.00 Dinars				
Générateur solaire photovoltaïque									
Marque du panneau PV	Puissance Nominale PMPP & Tension nominale	Courant à Puissance maximale IMPP	Puissance de crête de l'installation PV	Nombre de rangées de panneaux en parallèle	Nombre de panneaux montés en série par rangée	Coût			
VICTRON 175W	175Wc 12V	9.03 A	700Wc	4	1	117 500.00 Dinars			
Régulateur de charge solaire MPPT									
Nombre de rangées de batteries	Si chaque rangée de batteries est branchée à un régulateur		Si le banc de batteries est branché à un seul régulateur		Marque retenue	Coût			
	Puissance minimale du régulateur	Courant de charge minimale du régulateur	Puissance minimale du régulateur	Courant de charge minimale du régulateur					
1	700W	58.3A	920W	60A	SmartSolar MPPT 150/60-Tr Victron	85 518.40 Dinars			
Onduleur									
Puissance	Marques	Puissance de crête	Puissance P et protection des batteries recommandée				Tension et Fréquence de sortie	Plage de tension d'alimentation	Coût
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	40°C	65°C			
640W - 960W	Phoenix Inverter 48/1200 230V VE.Direct SCHUKO Victron (48V / 1200VA)	2200 W	1000/850W	/	/	/	210V à 245V 50Hz ou 60 Hz	36.8 V à 62 V	85 518.40 Dinars
Coût de la structure porteuse de l'installation photovoltaïque								23 500.00 Dinars	
20% par rapport au coût total du générateur									
Prix d'accessoires, de la main d'œuvre et divers								89 652.08 Dinars	
10% par rapport aux coûts de composants solaires									
Coût total de l'installation photovoltaïque								1 009 672.88 Dinars	

Tableau 3.2 : Coûts du système PV ayant une charge journalière de 3 kWh

Batteries solaires									
Capacité du banc de batteries	Marque	Tension nominale & Capacité	Nombre de batteries		Coût				
			Nombre de rangées de batteries en parallèle	Nombre de batteries montées en série par rangée					
1392.85 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 1.56kWh	12V 130Ah	11	1	746 820.00 Dinars				
Générateur solaire photovoltaïque									
Marque du panneau PV	Puissance Nominale PMPP & Tension nominale	Courant à Puissance maximale IMPP	Puissance crête de l'installation PV	Nombre de rangées de panneaux en parallèle	Nombre de panneaux montés en série par rangée	Coût			
VICTRON 175W	175Wc 12V	9.03 A	875Wc	5	1	146 810.00 Dinars			
Régulateur de charge solaire MPPT									
Nombre de rangées de batteries	Si chaque rangée de batteries est branchée à un régulateur		Si le banc de batteries est branché à un seul régulateur		Marque retenue	Coût			
	Puissance minimale du régulateur	Courant de charge minimale du régulateur	Puissance minimale du régulateur	Courant de charge minimale du régulateur					
1	875W	79.51A	920W	85 A	SmartSolar MPPT 150/85-Tr VE.Can Victron	127 460.80 Dinars			
Onduleur									
Puissance	Marques	Puissance de crête	Puissance P et protection des batteries recommandée				Tension et Fréquence de sortie	Plage de tension d'alimentation	Coût
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	40°C	65°C			
1600 VA 1300 W	Phoenix Inverter 48/1600 230V Smart Victron (48V / 1600VA)	3000W	1200 W 800 W	/	/	/	210V à 245V 50Hz ou 60 Hz	37.2 - 68 V	134 971.20 Dinars
Coût de la structure porteuse de l'installation photovoltaïque						29 362.00	Dinars		
Prix d'accessoires, de la main d'œuvre et divers						115 606.2	Dinars		
Coût total de l'installation photovoltaïque						1 301 030.20	Dinars		

Tableau 3.3 : Coûts du système PV ayant une charge journalière de 3.5 kWh

Batteries solaires									
Capacité du banc de batteries	Marque	Tension nominale & Capacité	Nombre de batteries		Coût				
			Nombre de rangées de batteries en parallèle	Nombre de batteries montées en série par rangée					
1625 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 1.56kWh	12V 130Ah	11	1	856 410.00 Dinars				
Générateur solaire photovoltaïque									
Marque du panneau PV	Puissance Nominale PMPP & Tension nominale	Courant à Puissance maximale IMPP	Puissance crête de l'installation PV	Nombre de rangées de panneaux en parallèle	Nombre de panneaux montés en série par rangée	Coût			
VICTRON 140W	140Wc 12V	7.22 A	980Wc	7	1	174 710.00 Dinars			
Régulateur de charge solaire MPPT									
Nombre de rangées de batteries	Si chaque rangée de batteries est branchée à un régulateur		Si le banc de batteries est branché à un seul régulateur		Marque retenue	Coût			
	Puissance minimale du régulateur	Courant de charge minimale du régulateur	Puissance minimale du régulateur	Courant de charge minimale du régulateur					
1	980W	81.66A	920W	85 A	SmartSolar MPPT 150/85-Tr VE.Can Victron	127 460.80 Dinars			
Onduleur									
Puissance	Marques	Puissance de crête	Puissance P et protection des batteries recommandée			Tension et Fréquence de sortie	Plage de tension d'alimentation	Coût	
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	P de sortie à 40°C				65°C
1600 VA 1300 W	Phoenix Inverter 48/1600 230V Smart Victron (48V / 1600VA)	3000W	1200 W 800 W	/	/	/	210V à 245V 50Hz ou 60 Hz	37.2 - 68 V	134 971.20 Dinars
Coût de la structure porteuse de l'installation photovoltaïque 20% par rapport au coût total du générateur						34 942.00 Dinars			
Prix d'accessoires, de la main d'œuvre et divers 10% par rapport aux coûts de composants solaires						1 293 552.20 Dinars			
Coût total de l'installation photovoltaïque						1 457 846.20 Dinars			

Tableau 3.4 : Coûts du système PV ayant une charge journalière de 4 kWh

Batteries solaires									
Capacité du banc de batteries	Marque	Tension nominale & Capacité	Nombre de batteries		Coût				
			Nombre de rangées de batteries en parallèle	Nombre de batteries montées en série par rangée					
1857.14 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 2.64kWh	12V 220Ah	9	1	963 500.00 Dinars				
Générateur solaire photovoltaïque									
Marque du panneau PV	Puissance Nominale PMPP & Tension nominale	Courant à Puissance maximale IMPP	Puissance crête de l'installation PV	Nombre de rangées de panneaux en parallèle	Nombre de panneaux montés en série par rangée	Coût			
VICTRON 140W	140Wc 12V	7.22 A	1120Wc	8	1	199 700.00 Dinars			
Régulateur de charge solaire MPPT									
Nombre de rangées de batteries	Si chaque rangée de batteries est branchée à un régulateur		Si le banc de batteries est branché à un seul régulateur		Marque retenue	Coût			
	Puissance minimale du régulateur	Courant de charge minimale du régulateur	Puissance minimale du régulateur	Courant de charge minimale du régulateur					
1	1120W	10.34A	1120W	15 A	SmartSolar MPPT 150/85-Tr VE.Can Victron	16 158.40 Dinars			
Onduleur									
Puissance	Marques	Puissance de crête	Puissance P et protection des batteries recommandée				Tension et Fréquence de sortie	Plage de tension d'alimentation	Coût
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	40°C	65°C			
2000 VA 1600 W	Phoenix Inverter 48/1600 230V Smart Victron (48V / 1600VA)	4000W	1450 W 1000 W	/	/	/	210 – 245 V 50Hz ou 60 Hz	37.2 - 68 V	145 416.00 Dinars
Coût de la structure porteuse de l'installation photovoltaïque								39 940.00 Dinars	
20% par rapport au coût total du générateur									
Prix d'accessoires, de la main d'œuvre et divers								132 477.44 Dinars	
10% par rapport aux coûts de composants solaires									
Coût total de l'installation photovoltaïque								1 497 191.84 Dinars	

Tableau 3.5 : Coûts du système PV ayant une charge journalière de 4.5 kWh

Batteries solaires									
Capacité du banc de batteries	Marque	Tension nominale & Capacité	Nombre de batteries		Coût				
			Nombre de rangées de batteries en parallèle	Nombre de batteries montées en série par rangée					
2089.28 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 2.64kWh	12V 220Ah	10	1	1 070 600.00 Dinars				
Générateur solaire photovoltaïque									
Marque du panneau PV	Puissance Nominale PMPP & Tension nominale	Courant à Puissance maximale IMPP	Puissance crête de l'installation PV	Nombre de panneaux PV		Coût			
				Nombre de rangées de panneaux en parallèle	Nombre de panneaux montés en série par rangée				
VICTRON 175W	175Wc 12V	9.03 A	1225Wc	7	1	205 600.00 Dinars			
Régulateur de charge solaire MPPT									
Si chaque rangée de batteries est branchée à un régulateur			Si le banc de batteries est branché à un seul régulateur		Marque retenue	Coût			
Nombre de rangées de batteries	Puissance minimale du régulateur	Courant de charge minimale du régulateur	Puissance minimale du régulateur	Courant de charge minimale du régulateur					
1	1225W	10.20A	1225W	15 A	SmartSolar MPPT 150/85-Tr VE.Can Victron	16 158.40 Dinars			
Onduleur									
Puissance	Marques	Puissance de crête	Puissance P et protection des batteries recommandée			Tension et Fréquence de sortie	Plage de tension d'alimentation	Coût	
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	40°C				65°C
3000 VA 2400 W	Phoenix Inverter 48/3000 230V Smart Victron (48V / 3000VA)	6000 VA	2200 W 1700 W	/	/	/	210 – 245 V 50 Hz ou 60 Hz	37.2 - 68 V	184 584.00 Dinars
Coût de la structure porteuse de l'installation photovoltaïque						41 120.00 Dinars			
20% par rapport au coût total du générateur									
Prix d'accessoires, de la main d'œuvre et divers						147 694.24 Dinars			
10% par rapport aux coûts de composants solaires									
Coût total de l'installation photovoltaïque						1 665 756.64 Dinars			

Tableau 3.6 : Coûts du système PV ayant une charge journalière de 5 kWh

Batteries solaires									
Capacité du banc de batteries	Marque	Tension nominale & Capacité	Nombre de batteries		Coût				
			Nombre de rangées de batteries en parallèle	Nombre de batteries montées en série par rangée					
2321.42 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 2.64kWh	12V 220Ah	11	1	1 177 600.00 Dinars				
Générateur solaire photovoltaïque									
Marque du panneau PV	Puissance Nominale PMPP & Tension nominale	Courant à Puissance maximale IMPP	Puissance crête de l'installation PV	Nombre de panneaux PV		Coût			
				Nombre de rangées de panneaux en parallèle	Nombre de panneaux montés en série par rangée				
VICTRON 175W	175Wc 12V	9.03 A	1400Wc	8	1	235 000.00 Dinars			
Régulateur de charge solaire MPPT									
Si chaque rangée de batteries est branchée à un régulateur			Si le banc de batteries est branché à un seul régulateur		Marque retenue	Coût			
Nombre de rangées de batteries	Puissance minimale du régulateur	Courant de charge minimale du régulateur	Puissance minimale du régulateur	Courant de charge minimale du régulateur					
1	1400W	10.60A	1400W	15 A	SmartSolar MPPT 150/85-Tr VE.Can Victron	16 158.40 Dinars			
Onduleur									
Puissance	Marques	Puissance de crête	Puissance P et protection des batteries recommandée			Tension et Fréquence de sortie	Plage de tension d'alimentation	Coût	
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	40°C				65°C
3000 VA 2400 W	Phoenix Inverter 48/3000 230V Smart Victron (48V / 3000VA)	6000 VA	2200 W 1700 W	/	/	/	210 – 245 V 50 Hz ou 60 Hz	37.2 - 68 V	184 584.00 Dinars
Coût de la structure porteuse de l'installation photovoltaïque						47 000.00 Dinars			
20% par rapport au coût total du générateur									
Prix d'accessoires, de la main d'œuvre et divers						161 334.24 Dinars			
10% par rapport aux coûts de composants solaires									
Coût total de l'installation photovoltaïque						1 821 676.64 Dinars			

Tableau 3.7 : Coûts du système PV ayant une charge journalière de 5.5 kWh

Batteries solaires									
Capacité du banc de batteries	Marque	Tension nominale & Capacité	Nombre de batteries		Coût				
			Nombre de rangées de batteries en parallèle	Nombre de batteries montées en série par rangée					
2553.57 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 2.64kWh	12V 220Ah	12	1	1 284 700.00 Dinars				
Générateur solaire photovoltaïque									
Marque du panneau PV	Puissance Nominale PMPP & Tension nominale	Courant à Puissance maximale IMPP	Puissance crête de l'installation PV	Nombre de rangées de panneaux en parallèle	Nombre de panneaux montés en série par rangée	Coût			
VICTRON 115W	115Wc 12V	6.04 A	1495Wc	13	1	261 300.00 Dinars			
Régulateur de charge solaire MPPT									
Si chaque rangée de batteries est branchée à un régulateur			Si le banc de batteries est branché à un seul régulateur		Marque retenue	Coût			
Nombre de rangées de batteries	Puissance minimale du régulateur	Courant de charge minimale du régulateur	Puissance minimale du régulateur	Courant de charge minimale du régulateur					
1	1495W	12.45A	1495W	15 A	SmartSolar MPPT 150/85-Tr VE.Can Victron	16 158.40 Dinars			
Onduleur									
Puissance	Marques	Puissance de crête	Puissance P et protection des batteries recommandée			Tension et Fréquence de sortie	Plage de tension d'alimentation	Coût	
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	40°C				65°C
3000 VA 2400 W	Phoenix Inverter 48/3000 230V Smart Victron (48V / 3000VA)	6000 VA	2200 W 1700 W	/	/	/	210 – 245 V 50 Hz ou 60 Hz	37.2 - 68 V	184 584.00 Dinars
Coût de la structure porteuse de l'installation photovoltaïque						52 260.00	Dinars		
20% par rapport au coût total du générateur									
Prix d'accessoires, de la main d'œuvre et divers						174 674.24	Dinars		
10% par rapport aux coûts de composants solaires									
Coût total de l'installation photovoltaïque						1 973 676.64	Dinars		

Tableau 3.8 : Coûts du système PV ayant une charge journalière de 6 kWh

Batteries solaires									
Capacité du banc de batteries	Marque	Tension nominale & Capacité	Nombre de batteries		Coût				
			Nombre de rangées de batteries en parallèle	Nombre de batteries montées en série par rangée					
2785.71 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 2.64kWh	12V 220Ah	13	1	1 391 700.00 Dinars				
Générateur solaire photovoltaïque									
Marque du panneau PV	Puissance Nominale PMPP & Tension nominale	Courant à Puissance maximale IMPP	Puissance crête de l'installation PV	Nombre de rangées de panneaux en parallèle	Nombre de panneaux montés en série par rangée	Coût			
VICTRON 175W	175Wc 12V	9.03 A	1750Wc	10	1	293 700.00 Dinars			
Régulateur de charge solaire MPPT									
Nombre de rangées de batteries	Si chaque rangée de batteries est branchée à un régulateur		Si le banc de batteries est branché à un seul régulateur		Marque retenue	Coût			
	Puissance minimale du régulateur	Courant de charge minimale du régulateur	Puissance minimale du régulateur	Courant de charge minimale du régulateur					
1	1750W	11.21A	1750W	15 A	SmartSolar MPPT 150/85-Tr VE.Can Victron	16 158.40 Dinars			
Onduleur									
Puissance	Marques	Puissance de crête	Puissance P et protection des batteries recommandée				Tension et Fréquence de sortie	Plage de tension d'alimentation	Coût
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	P de sortie à 40°C	P de sortie à 65°C			
3000 VA 2400 W	Phoenix Inverter 48/3000 230V Smart Victron (48V / 3000VA)	6000 VA	2200 W 1700 W	/	/	/	210 – 245 V 50 Hz ou 60 Hz	37.2 - 68 V	184 584.00 Dinars
Coût de la structure porteuse de l'installation photovoltaïque						58 740.00 Dinars			
20% par rapport au coût total du générateur									
Prix d'accessoires, de la main d'œuvre et divers						188 614.24 Dinars			
10% par rapport aux coûts de composants solaires									
Coût total de l'installation photovoltaïque						2 133 496.64 Dinars			

Tableau 3.9 : Coûts du système PV ayant une charge journalière de 6.5 kWh

Batteries solaires									
Capacité du banc de batteries	Marque	Tension nominale & Capacité	Nombre de batteries		Coût				
			Nombre de rangées de batteries en parallèle	Nombre de batteries montées en série par rangée					
3017.85 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 2.64kWh	12V 220Ah	14	1	1 498 800.00 Dinars				
Générateur solaire photovoltaïque									
Marque du panneau PV	Puissance Nominale PMPP & Tension nominale	Courant à Puissance maximale IMPP	Puissance crête de l'installation PV	Nombre de panneaux PV		Coût			
				Nombre de rangées de panneaux en parallèle	Nombre de panneaux montés en série par rangée				
VICTRON 115W	115Wc 12V	6.04 A	1840Wc	16	1	321 600.00 Dinars			
Régulateur de charge solaire MPPT									
Nombre de rangées de batteries	Si chaque rangée de batteries est branchée à un régulateur		Si le banc de batteries est branché à un seul régulateur		Marque retenue	Coût			
	Puissance minimale du régulateur	Courant de charge minimale du régulateur	Puissance minimale du régulateur	Courant de charge minimale du régulateur					
1	1840W	10.95A	1840W	15 A	SmartSolar MPPT 150/85-Tr VE.Can Victron	16 158.40 Dinars			
Onduleur									
Puissance	Marques	Puissance de crête	Puissance P et protection des batteries recommandée				Tension et Fréquence de sortie	Plage de tension d'alimentation	Coût
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	P de sortie à 40°C	P de sortie à 65°C			
5000 VA 4000 W	Phoenix Inverter 48/5000 230V Smart Victron (48V / 5000VA)	10000 VA	3700 W 2800 W	/	/	/	210 – 245 V 50 Hz ou 60 Hz	37.2 - 68 V	276 630.40 Dinars
Coût de la structure porteuse de l'installation photovoltaïque 20% par rapport au coût total du générateur								64 320.00 Dinars	
Prix d'accessoires, de la main d'œuvre et divers 10% par rapport aux coûts de composants solaires								211 318.88 Dinars	
Coût total de l'installation photovoltaïque								2 388 827.68 Dinars	

Tableau 3.10 : Coûts du système PV ayant une charge journalière de 7 kWh

Batteries solaires									
Capacité du banc de batteries	Marque	Tension nominale & Capacité	Nombre de batteries		Coût				
			Nombre de rangées de batteries en parallèle	Nombre de batteries montées en série par rangée					
3250 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 2.64kWh	12V 220Ah	15	1	1 605 900.00 Dinars				
Générateur solaire photovoltaïque									
Marque du panneau PV	Puissance Nominale PMPP & Tension nominale	Courant à Puissance maximale IMPP	Puissance crête de l'installation PV	Nombre de rangées de panneaux en parallèle	Nombre de panneaux montés en série par rangée	Coût			
VICTRON 175W	175Wc 12V	9.03 A	1925Wc	11	1	323 100.00 Dinars			
Régulateur de charge solaire MPPT									
Nombre de rangées de batteries	Si chaque rangée de batteries est branchée à un régulateur		Si le banc de batteries est branché à un seul régulateur		Marque retenue	Coût			
	Puissance minimale du régulateur	Courant de charge minimale du régulateur	Puissance minimale du régulateur	Courant de charge minimale du régulateur					
1	1840W	10.69A	1840W	15 A	SmartSolar MPPT 150/85-Tr VE.Can Victron	16 158.40 Dinars			
Onduleur									
Puissance	Marques	Puissance de crête	Puissance P et protection des batteries recommandée				Tension et Fréquence de sortie	Plage de tension d'alimentation	Coût
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	P de sortie à 40°C	P de sortie à 65°C			
5000 VA 4000 W	Phoenix Inverter 48/5000 230V Smart Victron (48V / 5000VA)	10000 VA	3700 W 2800 W	/	/	/	210 – 245 V 50 Hz ou 60 Hz	37.2 - 68 V	276 630.40 Dinars
Coût de la structure porteuse de l'installation photovoltaïque						64 620.00 Dinars			
20% par rapport au coût total du générateur									
Prix d'accessoires, de la main d'œuvre et divers						222 178.88 Dinars			
10% par rapport aux coûts de composants solaires									
Coût total de l'installation photovoltaïque						2 508 587.67 Dinars			

Faisant suite à ces résultats, il est possible de dresser la figure 3.1 qui généralise la variation des coûts du système photovoltaïque pour les tensions de 12V, 24V et 48V en fonction de la charge journalière.

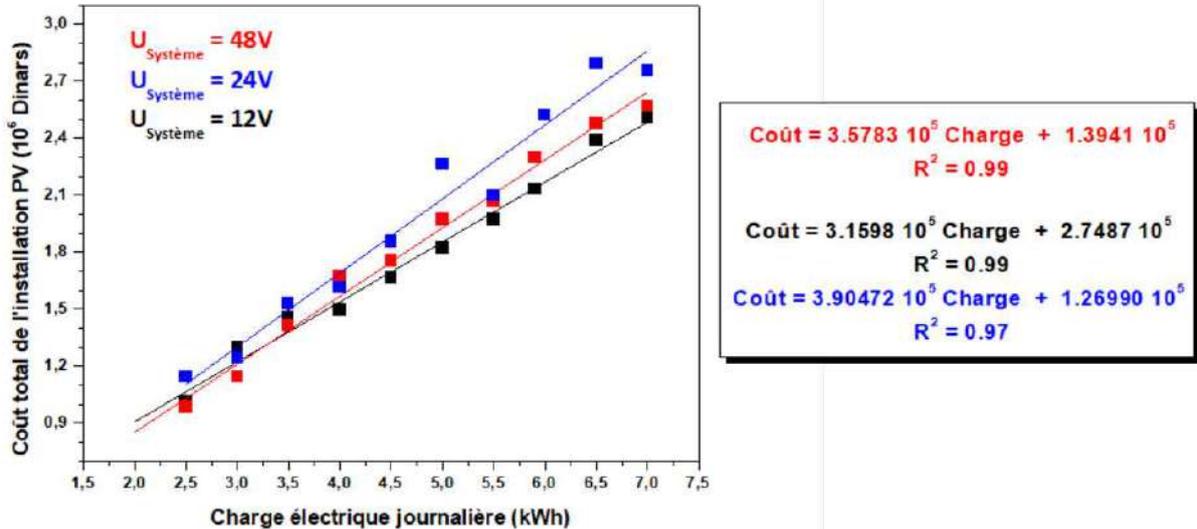


Figure 3.1 : Coûts total de l'installation photovoltaïque en fonction de la charge électrique journalière

Les résultats montrent que le système photovoltaïque autonome ayant une tension de 12V est le plus économe au-delà d'une capacité de 3.24 kWh. Cependant, pour des charges plus faibles, un système photovoltaïque autonome d'une tension nominale de 48V représente une meilleure alternative. Une tension nominale de 24V engendre une installation plus coûteuse.

3.3. Rentabilité, retour d'investissement et paramètres influents

Pour calculer la rentabilité d'un système solaire photovoltaïque, et donc le nombre d'années nécessaires pour rembourser les frais de l'investissement initial, il faut prendre en considération la puissance totale de l'installation, le coût de l'installation, la consommation annuelle du ménage et le coût de l'électricité conventionnelle. Grâce à ces données, il est possible de simuler la rentabilité du projet en estimant le nombre d'années avant le remboursement de l'investissement initial. La rentabilité, l'efficacité et la productivité d'un système photovoltaïque intégré sont réalisées lorsque les économies générées par l'installation (autoconsommation) dépassent l'investissement initial.

On suppose que les factures d'électricité issue du réseau resteront les mêmes au fil des années. En revanche, les batteries solaires ont une durée de vie limitée, ce qui signifie que le coût d'un système photovoltaïque augmente avec le temps.

Mathématiquement, le temps de retour de l'investissement est obtenu en déterminant le point de l'intersection des deux courbes. La première représente la facture de l'électricité cumulée sur les années sans investissement. La seconde représente la somme de la facture d'électricité après l'investissement au fil des années et le coût de l'ensemble du système photovoltaïque au cours des années à venir. La valeur nulle déduite de la différence entre ces deux fonctions représente le temps de retour de l'investissement. Si cette différence est croissante et toujours positive au fil des années, cela signifie qu'il n'y aura pas de retour sur investissement, ce qui rend l'installation non rentable. En revanche, des valeurs négatives indiquent qu'il y aura un retour, et qu'au-delà d'un moment, il y aura un gain financier bénéfique.

La facture d'électricité ordinaire, c'est-à-dire avant l'investissement au cours des années, est donnée par l'équation suivante :

$$\text{Facture d'électricité cumulée avant l'investissement} = \text{Facture d'électricité annuelle avant l'investissement} \times \text{Temps} \quad (3.1)$$

Le coût total, couvrant le coût du système photovoltaïque et la facture d'électricité cumulée au cours des années après l'investissement, est formulé par l'équation suivante :

$$\text{Coût total après l'investissement} = \text{Coût du système PV} + \text{Facture d'électricité cumulée après l'investissement} \quad (3.2)$$

$$\text{Facture d'électricité cumulée après l'investissement} = \text{Facture d'électricité annuelle après l'investissement} \times \text{Temps} \quad (3.2)$$

Soit une habitation qui consomme 14 146.32 kWh par an. La charge à alimenter par un système photovoltaïque autonome est de 4 kWh par jour. Nous voulons étudier par la suite la rentabilité financière pour deux cas différents.

1^{er} cas

La tension nominale du système = 12 V, la durée de vie des batteries = 15 ans et le coût unitaire de l'électricité conventionnelle = 75 Dinars. Ce dernier représente le coût de

l'électricité conventionnelle le plus cher au monde, il correspond à celui de Liechtenstein. La figure 3.2 donne l'évolution du coûts du système photovoltaïque au cours des années. La figure 3.3 indique le coûts du banc de batterie par rapport au coûts total du système photovoltaïque tout entier. Le temps de retour d'investissement est obtenu en déterminant le point de l'intersection des deux courbes de coûts comme l'indique la figure 3.4 ou en calculant la valeur nulle de leurs écarts, conformément à la figure 3.5.

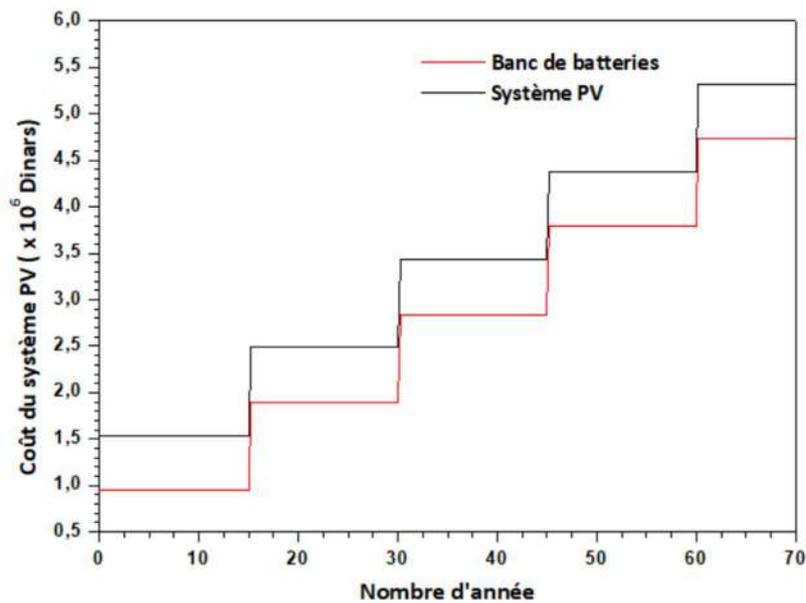


Figure 3.2 : Coût du banc de batteries comparé à celui du système photovoltaïque (1^{er} cas)

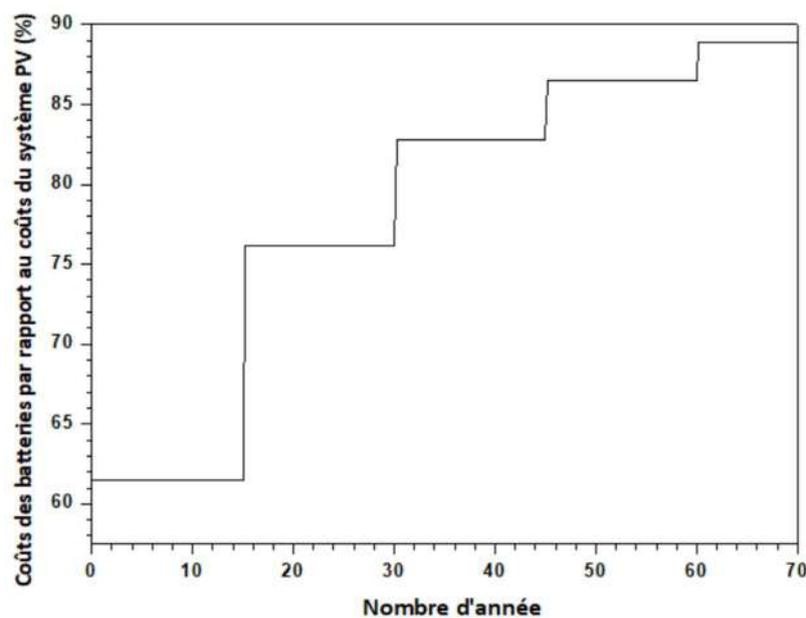


Figure 3.3 : Coût des batteries solaires par rapport à celui du système PV (1^{er} cas)

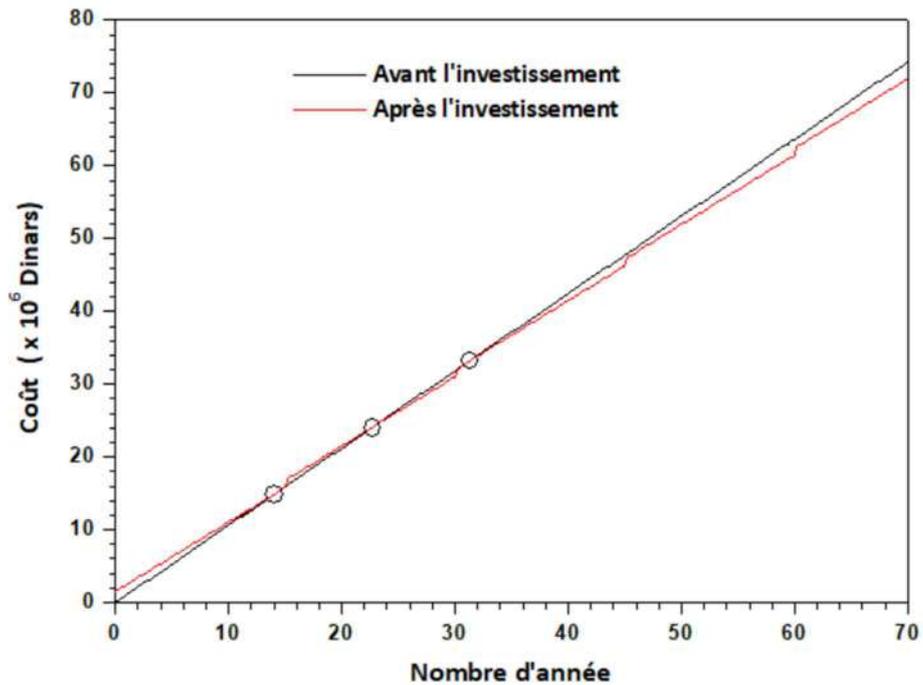


Figure 3.4 : Temps de retour d'investissement déduit des points d'intersection des deux courbes de coûts (1^{er} cas)

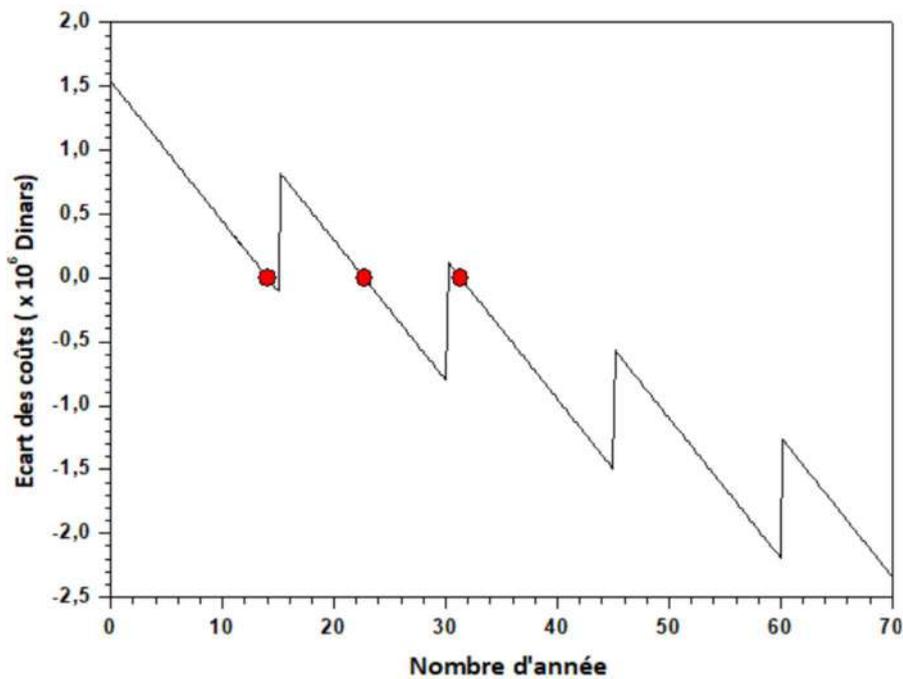


Figure 3.5 : Temps de retour d'investissement déduit de l'écart entre les deux courbes de coûts (1^{er} cas)

Les résultats trouvés prouvent que le retour d'investissement final dans ce cas est approximativement 31 ans 04 mois et 08 jours. Nous pouvons considérer que le système photovoltaïque est moyennement rentable. La compensation du capital

investi peut être réalisée au bout de 14 ans et 18 jours puis au bout de 22 ans 8 mois et 16 jours juste après le renouvellement du banc de batteries.

2^{ème} cas

La tension nominale du système = 48 V, la durée de vie des batteries = 5 ans. Le coût unitaire de l'électricité conventionnelle = 16.5 Dinars. Il représente le coût algérien de l'électricité conventionnelle. La figure 3.6 donne l'évolution du coûts du système photovoltaïque au cours des années. La figure 3.7 indique le coûts du banc de batteries par rapport au coûts total du système photovoltaïque tout entier. Le temps de retour d'investissement est déduit des figures 3.8 et 3.9.

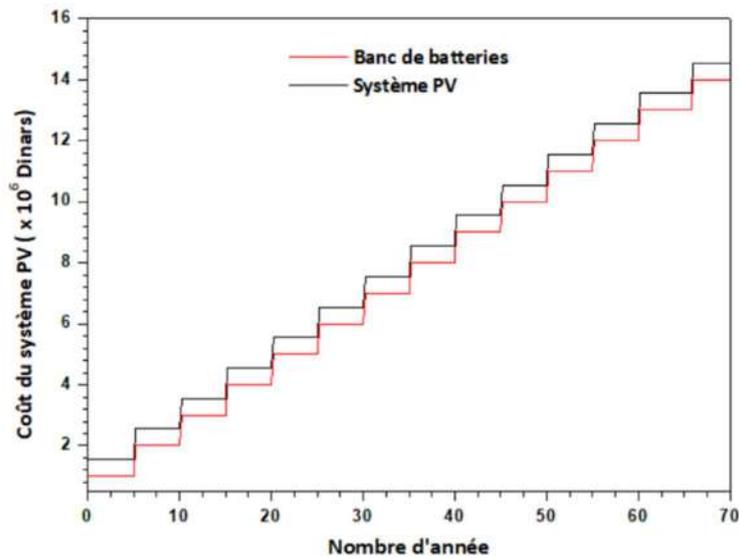


Figure 3.6 : Coût du banc de batteries comparé à celui du système photovoltaïque (2^{ème} cas)

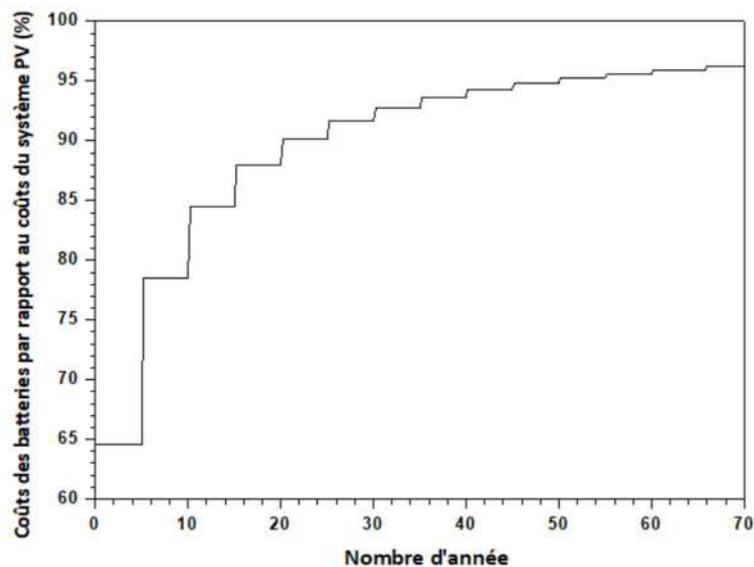


Figure 3.7 : Coût des batteries solaires par rapport à celui du système PV (2^{ème} cas)

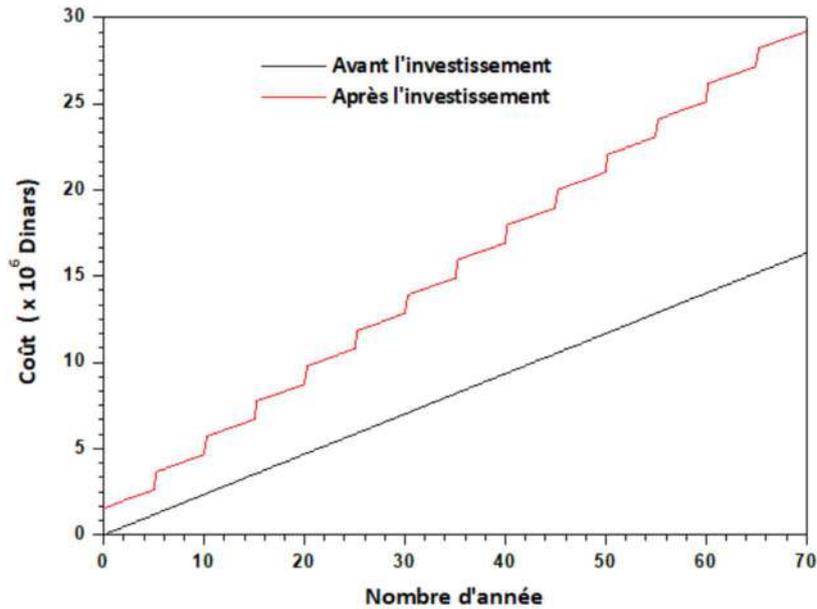


Figure 3.8 : Temps de retour d'investissement déduit des points d'intersection des deux courbes de coûts (2^{ème} cas)

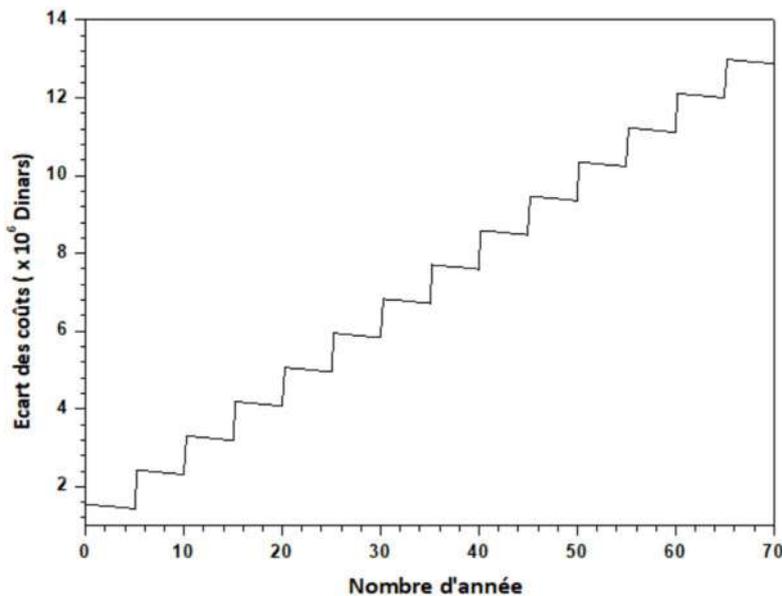


Figure 3.9 : Temps de retour d'investissement déduit de l'écart entre les deux courbes de coûts (2^{ème} cas)

Selon ces résultats, les courbes des coûts sont divergentes, ce qui confirme que dans ce cas, il n'y aura aucun retour d'investissement. La raison est due principalement au faible coût de l'électricité conventionnelle en Algérie et à la durée (cycle) de vie limitée des batteries solaires. Cette situation signifie que le propriétaire de cette installation solaire ne réalise aucun bénéfice sur le coût de son installation. La généralisation des résultats nous conduit à proposer le **tableau 3.11**.

Tableau 3.11 : Rentabilité financière d'un système photovoltaïque autonome d'une capacité journalière de 4 kWh

Durée de vie des batteries	Coût unitaire de l'électricité conventionnelle	Tension du système PV	Système non rentable	Système rentable ou moyennement rentable	Temps de retour d'investissement	
5 ans	16.5 Dinars 75.0 Dinars	12 V	x	x	14 ans 18 jours / 22 ans 8 mois et 16 jours / 31 ans 4 mois et 8 jours	
10 ans	16.5 Dinars 75.0 Dinars		x x			Le 1 ^{er} retour est à 40 ans
15 ans	16.5 Dinars 75.0 Dinars		x	x		
5 ans	16.5 Dinars 75.0 Dinars	24 V	x x			
10 ans	16.5 Dinars 75.0 Dinars		x x			
15 ans	16.5 Dinars 75.0 Dinars		x	x		20 ans 8 mois et 16 jours
5 ans	16.5 Dinars 75.0 Dinars	48 V	x x			
10 ans	16.5 Dinars 75.0 Dinars		x x			Le 1 ^{er} retour est à 60 ans
15 ans	16.5 Dinars 75.0 Dinars		x	x		

Une étude menée par l'Agence Internationale de l'Énergie AIE prévoit que l'électricité solaire sera l'énergie la moins chère au monde d'ici 2030 et qu'elle pourrait représenter près de 30% de la production de l'électricité mondiale d'ici 2050.

Cette prévision s'aligne parfaitement avec l'accroissement des prix actuels de l'énergie fossile. L'élévation de l'électricité conventionnelle engendre systématiquement une meilleure rentabilité financière des systèmes photovoltaïques autonomes selon les résultats affichés au tableau précédent. Le cycle de vie des batteries solaires doit faire référence à la plus longue durée possible pendant laquelle elles peuvent maintenir des performances optimales tout au long de ses cycles de charge et de décharge. La batterie est donc le point faible de ce type d'installation

solaire. Sa durée de vie est limitée et dépend de la technologie AGM / GEL / Lithium/... Les batteries solaires de type GEL peuvent retenir 5 ans s'il n'y a pas de décharge profonde. En outre, les batteries au lithium se chargent plus rapidement et présentent un meilleur taux d'auto-décharge, mais son avantage principal est sa durée de vie.

3.4. Conclusion

Les résultats de ces travaux menés indiquent qu'aux prix actuels de l'électricité, l'utilisation de batteries est moins rentable que la vente de l'énergie conventionnelle, à moins que le prix des batteries chute drastiquement où le monde connaît une révolution des technologies qui peuvent être porteuses d'un nouveau contexte. Heureusement, grâce à des recherches très poussées, la technologie et les performances des batteries solaires évoluent à un rythme effréné.

Avant toute chose, un particulier doit identifier des batteries solaires qui détiennent le meilleur rapport qualité-prix vis-à-vis les spécificités de l'installation photovoltaïque et le mode de sa consommation énergétique.

D'autre part, un système photovoltaïque autonome ayant une tension de 12V est le plus économe si sa capacité de production journalière dépasse 3.24 kWh. Pour des charges plus faibles, un système photovoltaïque autonome d'une tension nominale de 48V représente une meilleure alternative. Une tension nominale de 24V engendre une installation plus coûteuse.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont conçus pour fonctionner indépendamment du réseau électrique et sont généralement conçus et dimensionnés pour alimenter certaines charges électriques en courant continu et/ou alternatif.

Ces systèmes peuvent être une alternative à l'alimentation électrique. Ils comprennent généralement des modules de charge solaire, des batteries de stockage et des commandes ou régulateurs. Les systèmes installés au sol ou sur le toit nécessitent une structure de montage et, si une alimentation en courant alternatif est souhaitée, un onduleur est également nécessaire. Dans de nombreux systèmes PV autonomes, les batteries sont utilisées pour le stockage de l'énergie, car elles peuvent représenter jusqu'à presque 65% du coût global du système PV autonome sur sa durée de vie. Un particulier doit donc identifier des batteries solaires qui détiennent le meilleur rapport qualité-prix vis-à-vis les spécificités de l'installation photovoltaïque et le mode de sa consommation énergétique.

En plus, un système photovoltaïque autonome ayant une tension de 12V est le plus économe si sa capacité de production journalière dépasse 3.24 kWh. Pour des charges plus faibles, un système photovoltaïque autonome d'une tension nominale de 48V représente une meilleure alternative. Une tension nominale de 24V engendre une installation plus coûteuse.

L'alimentation d'une maison en électricité grâce à l'énergie solaire photovoltaïque est une bonne idée, mais c'est surtout un investissement important qui peut faire peur.

Le soleil n'est pas le seul paramètre à prendre en considération pour tester la rentabilité des systèmes photovoltaïques.

- La batterie solaire est le " maillon faible " d'un système solaire autonome. Sa durée de vie est limitée et dépend de la technologie AGM / GEL / Lithium. Dans notre cas, nous avons opté pour des batteries solaires GEL. Par rapport à ces batteries traditionnelles, les batteries lithium-ion se chargent plus rapidement, durent plus

longtemps et ont une densité de puissance plus élevée, ce qui se traduit par une plus grande autonomie, malheureusement elles sont coûteuse.

- Le prix de l'électricité issue du réseau conventionnel est un facteur essentiel. Le coût compétitif de l'électricité conventionnelle est très faible par rapport aux autres pays du monde.

Le principe d'un système à couplage direct est à privilégier dans ce genre de situation, il revient à connecter un panneau solaire directement à une charge en courant continu. La charge ne fonctionne que pendant les heures d'ensoleillement. Comme il n'y a pas de stockage d'énergie dans cette configuration, ceci rend ces systèmes adaptés à des applications courantes telles que les ventilateurs, les pompes à eau et les petites pompes de circulation pour les systèmes de chauffage solaire de l'eau...Etc.

Les systèmes photovoltaïques peuvent être considérés comme solution respectueuse de l'environnement, principalement parce qu'ils utilisent une ressource naturelle et renouvelable. Ils seront rentables dans certaines situations, par exemple :

- Si l'état proposera des subventions et des aides financières pour ce type d'installations, en remplacement des subventions prévues pour l'électricité conventionnelle du réseau, d'autant plus qu'elles ne produisent pas de gaz à effet de serre, contrairement aux énergies fossiles comme le charbon ou le gaz naturel.
- Les installations photovoltaïques devront être privilégiées si l'alimentation en électricité conventionnelle coûte très cher en raison de la grande distance par rapport au réseau de distribution ou en raison d'autres facteurs. Les systèmes photovoltaïques autonomes sont utilisés donc dans les zones qui ne sont pas facilement accessibles ou qui n'ont pas accès à un réseau électrique.

Références

1. A.O.M. Maka, J.M. Alabid, Solar energy technology and its roles in sustainable development, *Clean Energy*, 2022, 6, 476 - 483.
2. S. Djeriou, Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone, Magister en Electrotechnique, Option : Machines Electriques, Université Ferhat Abbas de Sétif, juillet 2011.
3. H. Kanchev, Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable : optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain, Doctorat en Génie Electrique, Cotutelle Internationale : Ecole Centrale de Lille et Université Technique de Sofia, janvier 2014.
4. Resilient housing design in fragile settings. <https://res-house.com> › 2023/08 › WS6-Slides PPT
5. O. Richardot, Réglage coordonné de tension dans les réseaux de distribution à l'aide de la production décentralisée, Doctorat de l'INP Grenoble en Génie Electrique, Octobre 2006, France.
6. Norton, Brian, *Harnessing Solar Heat*, 2013, Springer. ISBN 978-94-007-7275-5.
7. What are the pros and cons of onshore wind energy?. Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics and Political Science., 12 January 2018. Archived from the original on 22 June 2019.
8. N.F. Jones, L. Pejchar, J.M. Kiesecker, The energy footprint: how oil, natural gas, and wind energy affect land for biodiversity and the flow of ecosystem services". *BioScience*, 2015, 65 (3): 290 - 301. doi:10.1093/biosci/biu224.
9. Global wind report 2019. Global wind energy council. 19 March 2020. Retrieved 28 March 2020.
10. Levelized cost of energy, levelized cost of storage, and levelized cost of hydrogen". *Lazard.com*. Retrieved April 2024.
11. A. Vourvoulis, Pros and Cons of Solar Energy, *GreenMatch/Blog/Pros & Cons of Solar Energy*, March 2024, <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2014/08/5-advantages-and-5-disadvantages-of-solar-energy>. Retrieved April 2024.
12. Wind energy technologies office, Advantages and challenges of wind energy, <https://www.energy.gov/eere/wind/advantages-and-challenges-wind-energy>. Retrieved April 2024.

13. Enel Green Power, All the advantages of geothermal energy, <https://www.enelgreenpower.com/learning-hub/renewable-energies/geothermal-energy/advantages>. Retrieved April 2024.
14. GreenMatch Blog, Advantages and disadvantages of geothermal energy – The source of renewable heat. <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2014/04/advantages-and-disadvantages-of-geothermal-energy>. Retrieved April 2024.
15. Energysage, The top pros and cons of hydropower. <https://www.energysage.com/about-clean-energy/hydropower/pros-cons-hydropower>. Retrieved April 2024
16. Catherine Lane, SolarReviews, Biomass energy pros and cons. <https://www.solarreviews.com/blog/biomass-energy-pros-and-cons>
17. RF Wireless World, Advantages and disadvantages of Thermal Energy. <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-disadvantages-of-Thermal-or-heat-energy.html>. Retrieved April 2024
18. Chauncey Crail , Corinne Tynan , Samantha Allen, Solar Energy Pros And Cons: What Are The Advantages And Disadvantages? <https://www.forbes.com/home-improvement/solar/solar-energy-pros-and-cons/>. Retrieved April 2024
19. S. Bensalem, Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires, Magister en Énergétique et Mécanique des Fluides, Université Ferhat Abbas – Sétif, 2011.
20. G. Boyle. Renewable Energy : Power for a Sustainable Future, 2nd ed. Oxford, UK: Oxford University Press, 2004.
21. Edition Masson, Les piles solaires, le composant et ces applications, 1985.
22. Photovoltaic effect, https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_effect#cite_note-3. Retrieved April 2024
23. A. Borni, Modélisation et commande des machines électriques, Thèse de Magister, université de Constantine, 2009, Algérie.
24. J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy, Le Pompage Photovoltaïque, Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA.
25. B. Chaouki, B. Tarek, Optimisation floue neuronale et génétique d'un système photovoltaïque connecté au réseau, Mémoire d'ingénieur, Biskra, 2007, Algérie.

26. A. Corinne, Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie, Habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003, France.
27. M. Mekhalfa, Croissance et étude de l'effet de l'hydrogène sur les propriétés du silicium polycristallin destiné à l'usage photovoltaïque, Thèse de Doctorat en Physique Semi-conducteurs, Université Badji Mokhtar Annaba, 2019, Algérie
28. R. Radbeh, Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones, Thèse de Doctorat en Électronique des hautes fréquences et optoélectronique, Université de Limoges, 2008, France.
29. P. Stéphane, Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, Thèse de Doctorat en Génie électrique, Université de Toulouse, 2009, France.
30. H. Kamelia, Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative, Magister en Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012, Algérie.
31. J.P. Goyheix, De l'électricité à partir du soleil ... l'énergie solaire, des informations et des réalisations, DESS Energétique à l'Université de Bordeaux - France. <http://sulfate.ch/Energie/A%20PARTIR%20DU%20SOLEIL.htm>
32. J.F. Reynaud, Recherches d'optimums d'énergie pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques, Doctorat en Génie Electrique, Université de Toulouse III – Paul Sabatier, 2011, France.
33. Y. Kherbiche, N. Ihaddadene, R. Ihaddadene, F. Hadji, J. Mohamed, A.H. Beghidja, Solar energy potential evaluation, case of study: M'Sila, an Algerian Province, International Journal of Sustainable Development and Planning, 2021, 16 (8), 1501 - 1508.
34. A.B. Stambouli, Z. Khiat, S. Flazi, Y. Kitamura, A review on the renewable energy development in Algeria: current perspective, energy scenario and sustainability issues, Renewable and Sustainable Energy, Reviews, 2012, 16 (7), 4445 - 4460.
35. M.R. Yaiche, A. Bouhanik, S.M.A. Bekkouche, A. Malek, T. Benouaz, Revised solar maps of Algeria based on sunshine duration, Elsevier Energy Conversion and Management, 82 (2014) 114 - 123.
36. M.R. Yaiche, A. Bouhanik, Atlas solaire algérien, Centre de Développement des Energies Renouvelables, 2013.

37. T.E. Boukelia, M.S. Mecibah, Parabolic trough solar thermal power plant: Potential, and projects development in Algeria, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21 (2013), 288 - 297.
38. T. Nacer, Etude de l'impact des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau électrique BT sur le bilan électrique des fermes agricoles, Thèse de Doctorat LMD en Electronique Option : Génie Electrique, Université de Blida 1, 2017, Algérie.
39. L. Aiche-Hamane, A. Khellaf, Evolution mensuelle de la ressource éolienne à travers l'Algérie, *Journal of Renewable Energies*, 2003, 147 - 152.
40. J.E. Ariot, Mécanique céleste, temps et calendriers, https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_mctc/impression.html Retrieved May 2024
41. M. Belhadj, Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome, Magister en Microélectronique Photovoltaïque, Universitaire de Bechar, 2008, Algérie.
42. S.M.A. Bekkouche, Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires, Doctorat en Physique Électronique et Modélisation, Université Abou-Bakr Belkaïd de Tlemcen, 2009, Algérie.
43. M. Capderou, Atlas solaire de l'Algérie, Modèles théoriques et expérimentaux, Vol. 1, Office des publications universitaires, EPAU, Algérie, 375, 1987.
44. F.M. Abreu Edgar, P. Canhoto, J. Costa Maria, Direct Normal Irradiance and circumsolar radiation: modelling, measurement and impact on Concentrating Solar Power, *Jornadas ICT 2017*, 25-27 Junho 2017, Braga, Portugal.
45. R. Kaoulal, Contribution à l'étude des systèmes solaires intègres aux bâtiments, Thèse de Doctorat en Physique Énergétique, Université Tahri Mohammed de Béchar, 2017, Algérie.
46. M.A.C. Haddam, Application de quelques notions de la conception bioclimatique pour l'amélioration de la température interne d'un habitat, Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 2015, Algérie.
47. A. Yilmaz, C. Şimşek, Calculation of the optimum PV panel incline angle for Mediterranean climate, *European Journal of Science and Technology*, 35, 322-329, 2022.
48. A. Morceli, A. Temmar, Taux et possibilités d'intégration de l'énergie photovoltaïque, Application à deux maisons individuelles à faible et à forte performance énergétique, Master en Energie Renouvelable Spécialité : Energie Renouvelable et Environnement Université de Ghardaïa, 2024, Algérie.

49. A. Chel, G.N. Tiwari, A. Chandra, Simplified method of sizing and life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic system, *Energy and Buildings*, 41 (2009) 1172-1180.
50. SECO, State energy conservation office, Austin, Texas, Estimating PV system size and cost, Fact Sheet 24, 1-4 (www.InfinitePower.org).



إذن بالطباعة (مذكرة ماستر)

بعد الاطلاع على التصحيحات المطلوبة على محتوى المذكرة المنجزة من طرف الطلبة التالية أسمائهم:

1. الطالب (ة) : عزوي اية
 2. الطالب (ة): مهية روى علياء
- تخصص : طاقات متجددة في الكهرو تقني
نمنح نحن الأساتذة :

الاسم و اللقب	الرتبة - الجامعة الأصلية	الصفة	الامضاء
بن حليلة وسام	أستاذ محاضر	مصحح (1)	
امعيز الحاج احمد حمزة	أستاذ مساعد (ب) MAB	مصحح (2)	
بوشلقة فاطمة	بوشلقة فاطمة	مصحح (3)	
بلغراس سيفية	أستاذة محاضرة أ (MCA)	مؤطر	

الإذن بالطباعة النسخة النهائية لمذكرة ماستر الموسومة بعنوان :

Adaptation et rentabilité d'une installation photovoltaïque autonome

إمضاء رئيس القسم

العلمي عبد اللطيف
رئيس قسم الآلية
و الكهروميكانيك

