

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou  
Faculté du Génie de la Construction  
Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

**En vue de l'obtention du diplôme de  
MASTER ACADEMIQUE EN GENIE MECANIQUE  
OPTION : ENERGETIQUE**

**Intitulé du sujet:**

**Etude et dimensionnement d'une installation  
photovoltaïque**



**Proposé par : M. R. NEBBALI**

**Etudié par : M. Rafik BELABED**

**Promotion 2016-2017**

# REMERCIEMENTS

*En premier lieu, je tiens à remercier le bon DIEU, de  
m'avoir donné*

*Le courage et la patience pour mener à bien ce  
Travail pendant toute cette longue année, je remercie  
également mes parents et toute ma famille pour tout ce  
qu'ils ont fait pour moi, mes vifs remerciements s'adressent  
à mon promoteur M. NEBBALI REZKI pour son aide, ses  
conseils, sa  
disponibilité durant toute la période de ce projet de fin  
D'études.*

*J'ai à cœur également de remercier tous ceux  
Qui m'ont aidé au sein de la centrale photovoltaïque de  
Ghardaïa. Je remercie également les membres du jury  
Qui ont accepté d'examiner et d'estimer ce travail.  
En fin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou  
de loin à la réalisation de ce travail.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes parents, qui étaient toujours là pour moi  
dès mon enfance, garce à eux que J'ai pu  
atteindre ce succès*

*Que Dieu les protège*

*A Mon cher frère : Hakim*

*A ma chère sœur : Lila*

*A toute ma famille*

*A tous mes amis et collègues sans exception.*

*Rafik*

# Liste des figures

Figure (I.1) : Plan de situation de la centrale.....	7
Figure (I.2) : synoptique d'une centrale photovoltaïque raccordée au réseau.....	9
Figure (II.1) : Coordonnées terrestres.....	14
Figure (II.2) : Coordonnées horizontales.....	16
Figure (II.3) : Schématisation des mouvements de la Terre autour du soleil.....	17
Figure (II.4) : Trajectoires apparentes du Soleil pour chacune de ces journées de l'hémisphère nord.....	18
Figure (II.5) : Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre.....	20
Figure (II.6) : Différents composants du rayonnement .....	22
Figure (II.7) : Différents appareils de mesure du rayonnement solaire.....	23
Figure (III.1) : structure basique d'une cellule solaire.....	25
Figure (III.2) : le semi-conducteur (silicium).....	26
Figure (III.3) : dopage de semi-conducteur de type n.....	26
Figure (III.4) : dopage de semi-conducteur de type p.....	27
Figure (III.5) : La jonction p-n.....	28
Figure (III.6) : l'effet photovoltaïque.....	29
Figure (III.7) : le principe de fonctionnement d'une cellule PV.....	30
Figure (III.8) : Cellule photovoltaïque monocristalline.....	31
Figure (III.9) : Cellule photovoltaïque poly-cristallin.....	31
Figure (III.10) : Cellule photovoltaïque amorphe.....	32
Figure (III.11) : les différentes zones de la caractéristique I (V).....	32
Figure (III.12) : Courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque.....	33
Figure (III.13) : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.....	34
Figure (III.14) : Caractéristique puissance tension d'une cellule photovoltaïque.....	34
Figure (III.15) : Evolution de la température I(V) (a) et P(V) (b) en fonction de l'irradiation .....	35

Figure (III.16) : Evolution de la caractéristique I(V) (a) et P(V) (b) pour différentes Température.....	36
Figure (III.17) : les différentes composants d'une installation photovoltaïque.....	38
Figure (III.18) : batterie ouverte au plomb.....	39
Figure (III.19) : Comparaison des différents types de batteries en énergie massique.....	40
Figure (III.20) : composition d'une batterie monobloc.....	41
Figure (III.21) : Association de deux batteries en série / en parallèle.....	44
Figure (III.22) : Le rôle de l'onduleur.....	45
Figure (III.23) : La boîte de jonction.....	47
Figure (IV.1) : Définition des angles pour un plan incliné : inclinaison $\beta$ , azimut $\chi$ et l'angle d'incidence $\theta$ .....	50
Figure (IV.2) : Aperçu d'une batterie solaire.....	55
Figure (IV.3) : régulateur de charge.....	56
Figure (IV.4) : le câble solaire.....	58
Figure (IV. 5) : image d'une maison équipée d'une installation photovoltaïque.....	58
Figure (IV.6) : les caractéristiques techniques du panneau photovoltaïque à utiliser dans les deux installations.....	63
Figure (IV.7) : La batterie solaire à utiliser pour les deux installations.....	65
Figure (IV.8) : Les deux types de régulateurs de charge à utiliser.....	68
Figure (IV.9) : l'onduleur a utilisé pour l'installation en courant alternatif.....	69

# Liste des Tableaux

Tableau (I.1) : Données des différentes technologies photovoltaïques utilisées dans la centrale.....	6
Tableau (I.2) : Bilan de production d'une installation photovoltaïque.....	10
Tableau (IV.1) : Relation entre la latitude et l'inclinaison des panneaux pour une utilisation annuelle.....	51
Tableau (IV.2) : Tension du champ en fonction de sa puissance crête .....	53
Tableau (IV.3) : Consommation énergétique de l'habitation.....	59
Tableau (IV.4) : Différentes charges fonctionnant en courant continu.....	61
Tableau (IV.5) : Différentes charges fonctionnant en courant alternatif.....	61
Tableau (IV.6) : Tensions des différentes installations.....	62
Tableau (IV.7) : Types de régulateurs de charge à utiliser dans les deux installations.....	68
Tableau (IV.8) : Variation de la section du câble en fonction de l'intensité du courant.....	71
Tableau (IV.9) : Résultats du dimensionnement des deux systèmes.....	72

# NOMENCLATURE

<b>Symboles</b>	<b>Désignations</b>	<b>Unités</b>
C	Capacité de la batterie	Ah
C <sub>ch</sub>	Capacité totale du champ photovoltaïque	Ah
D	Décharge maximale	%
E	Flux de rayonnement solaire	W.m <sup>-2</sup>
E <sub>0</sub>	Constante solaire	W.m <sup>-2</sup>
E <sub>t</sub>	Consommation journalière	Wh/jour
FF	Facteur de forme	/
H	Hauteur de soleil	Degré
I	Le courant aux bornes de la cellule PV	A
I <sub>cc</sub>	Le courant de court-circuit	A
I <sub>MPP</sub>	Courant de puissance maximale	A
I <sub>mod</sub>	Le courant aux bornes du module PV	A
I <sub>e</sub>	Courant d'entrée	A
I <sub>s</sub>	Courant de sortie	A
J	Numéro de jour de l'année	/
K	Coefficient correcteur	/
L	Longitude	Degré
N <sub>m</sub>	Nombre de modules photovoltaïques	/
N <sub>s</sub>	Nombre de modules PV connectés en séries	/
N <sub>p</sub>	Nombre de modules PV connectés en parallèles	/
P <sub>cu</sub>	Puissance crête unitaire d'un module photovoltaïque	W
P <sub>ch</sub>	Puissance crête du champ photovoltaïque	W
P <sub>pv</sub>	La puissance disponible en sortie du GPV	W
P <sub>r</sub>	Puissance réactive	VAR
R	Résistance	Ω
S	section du câble	mm <sup>2</sup>
SS	Durée d'ensoleillement	h
SS <sub>0</sub>	Durée d'Insolation maximale	h
t	Temps d'utilisation	h
TSV	Temps solaire vrai	h
U	la tension aux bornes de la cellule PV	V

# NOMENCLATURE

$U_{\text{mod}}$	La tension aux bornes du module PV	V
$U_{\text{co}}$	La tension du circuit ouvert	V
$U_{\text{MPP}}$	Tension de puissance maximale	V
$V_{\text{ch}}$	Tension du champ photovoltaïque	V
$V_{\text{m}}$	Tension délivrée par un seul module photovoltaïque	V
$\rho$	Résistivité	$\Omega.m$
$L$	Longueur du câble	m
$\alpha$	Azimut de soleil	Degré
$\varphi$	Latitude	Degré
$\beta$	Inclinaison	Degré
$\delta$	Déclinaison	Degré
$\omega$	Angle horaire	Degré
$\sigma$	Fraction d'ensoleillement	/
$\eta_m$	Rendement des modules photovoltaïque	%

## Abréviations :

**PV** : Photovoltaïque

**Si** : Silicium

**GPV** : Générateur Photovoltaïque

**PPM** : Point de Puissance Maximum

**FF** : Facteur de Forme

**MPPT** : Maximum Power Point Tracker

**CC** : Courant Continu

**CA** : Courant Alternatif

# Table de matière

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

## Chapitre I : présentation de la société SKTM

1. Introduction .....	3
2. Présentation de SKTM .....	3
2.1. Définition de SKTM.....	3
2.2. Objectifs de SKTM.....	4
2.3. Principale tâche de SKTM.....	4
2.4. Réalisations et perspectives .....	4
3. Centrale photovoltaïque de Oued N'echou (Ghardaïa).....	5
3.1. Description de la centrale.....	5
3.2. Localisation.....	6
3.3. Historique.....	7
3.4. Description technique de la centrale.....	8
4. Description d'un système photovoltaïque .....	8
4.1. Production et rendement de l'installation photovoltaïque .....	10
5. Conclusion.....	11

## Chapitre II: Les notions de base du gisement solaire

1. Introduction .....	12
2. Rayonnement solaire.....	12
3. Aspects géométriques .....	13
3.1. Systèmes de coordonnées.....	13
3.1.1. Coordonnées terrestres .....	13
3.1.2. Coordonnées équatoriales .....	14
3.1.3. Coordonnées horizontales .....	15

3.2. Mouvement de la terre .....	16
3.3. Mouvement apparent du Soleil.....	17
3.3.1. Le midi solaire.....	17
3.4. Durée et taux d'ensoleillement.....	18
4. Aspects énergétiques .....	19
4.1. L'atmosphère terrestre.....	19
4.2. Caractéristiques du rayonnement solaire.....	19
4.2.1. Composition.....	19
4.2.2. Dualité de la lumière.....	20
4.3. Types du rayonnement solaire.....	21
5. Mesure du rayonnement solaire .....	22
6. Conclusion.....	23

### Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

1. Introduction .....	24
2. La cellule photovoltaïque .....	24
3. Conversion photovoltaïque .....	25
3.1. Semi-conducteur.....	25
3.2. Le dopage de semi-conducteur .....	26
3.3. La Jonction PN .....	27
4. Effet photovoltaïque .....	28
5. Principe de fonctionnement.....	29
6. Les types des cellules photovoltaïques.....	30
7. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque .....	32
7.1. Zones de fonctionnement du module photovoltaïque.....	32
7.2. Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.....	33
7.3. Influence de la température et de l'éclairement.....	35
7.4. Facteur de forme (FF).....	36

8. Les différents composants d'un système solaire photovoltaïque .....	38
1. Batteries .....	38
1.1. Types d'accumulateurs .....	39
1.2. Comparaison des types de batteries en énergie massique.....	40
1.3. Composition d'une batterie solaire plomb- acide.....	40
1.4. Principe de fonctionnement .....	41
1.5. calcul de la capacité des batteries .....	42
1.6. La durée de vie d'une batterie solaire .....	42
1.7.les critères de choix d'une batterie solaire.....	42
1.8. Association de batteries .....	43
2.Régulateur de charge .....	44
2.1. Technologies des régulateurs.....	44
3)Onduleur.....	45
4) Boite de jonction .....	46
9. Conclusion .....	47

## Chapitre IV : dimensionnement d'une installation photovoltaïque

1. Introduction .....	48
2. procédure du calcul.....	48
2.1. Etape I. Consommation énergétique.....	48
2.2. Etape II. Energie solaire récupérable.....	49
2.3. Etape III. Données météorologiques .....	51
2.4. Etape IV. Dimensionnement du générateur photovoltaïque.....	52
2.4.1. Puissance crête d'un générateur photovoltaïque.....	52
2.4.2. Tension de fonctionnement du champ photovoltaïque.....	53
2.5. Etape V. Nombre de panneaux photovoltaïques à utiliser.....	53
2.6. Etape VI. Dimensionnement du parc de batteries.....	54
2.7. Etape VII. Dimensionnement du régulateur de charge .....	55

2.8. Etape VIII. Dimensionnement de l'onduleur .....	56
2.9. Etape IX. Le dimensionnement des câbles électriques solaires.....	57
3.Application .....	58
4.Conclusion.....	73
Conclusion générale.....	74

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

# Introduction générale

L'énergie est la base de toute activité humaine. De nos jours, une grande partie de la demande mondiale en énergie est assurée à partir de ressources fossiles. Cependant, les réserves de combustibles fossiles sont limitées. En effet, la croissance de la demande énergétique mondiale, l'épuisement inévitable des ressources fossiles et le réchauffement Climatique causé par l'émission des gaz à effet de serre imposent le recours aux énergies propres. Certains pays développés se sont orientés vers l'énergie nucléaire qui présente des risques d'accidents graves. C'est pourquoi on s'intéresse actuellement aux énergies renouvelables. L'énergie **solaire photovoltaïque** constitue une alternative que beaucoup de pays envisagent à l'horizon 2030.

C'est une énergie électrique produite au moyen de panneaux solaires qui permettent de convertir une partie du rayonnement solaire. L'électricité ainsi produite peut être consommée sur place ou alimenter un réseau de distribution. Une installation solaire photovoltaïque peut être implantée sur tous les types de bâtiment : maison individuelle, bâtiment d'habitation, etc.

Avant, L'énergie solaire photovoltaïque était limitée aux applications rurales pour l'alimentation des sites isolés en électricité comme cela a été le cas en Algérie. Mais depuis quelques années, le solaire photovoltaïque a fait son entrée dans les agglomérations, ce qui a pour effet l'augmentation sensible de la demande en modules photovoltaïques.

Afin de mieux exploiter cette énergie, il est nécessaire de connaître la distribution de l'irradiation solaire sur le lieu de l'implantation prévu pour l'installation photovoltaïque, pour différentes orientations et inclinaisons.

L'objectif de ce travail est de donner un aperçu sur la méthodologie de calcul et de dimensionnement d'une installation photovoltaïque.

Pour ce faire, on a effectué un stage de courte durée a la société SKTM (SHARIKET KAHRABA WA TAKET MOUTADJADIDA) sise à Ghardaïa. Ce stage nous a permis de parfaire nos connaissances dans le domaine du photovoltaïque. Le chapitre I fait état de cette société. Au chapitre II, on rappelle les notions de base sur le gisement solaire. La composition d'une cellule solaire, son mode de fonctionnement et son exploitation dans une installation photovoltaïque a fait l'objet du chapitre III.

# **Introduction générale**

Le dernier chapitre (chapitre IV) développe le dimensionnement d'une installation photovoltaïque appliqué à une habitation donnée avec toutes les différentes étapes à suivre.

En conclusion, une synthèse des résultats de calculs d'une installation photovoltaïque est présentée.

# CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION DE LA SOCIÉTÉ SKTM

# Chapitre I : présentation de la société SKTM

---

## 1. Introduction

Aujourd'hui le monde entier a pris conscience de l'importance des énergies renouvelables qui sont devenues une priorité pour l'avenir. L'Algérie dispose de grands potentiels en énergies renouvelables, essentiellement en énergie éolienne et énergie solaire avec un gisement parmi les plus élevés au monde (05 milliards de GWH/an), avec une durée d'ensoleillement sur le Sahara et les Hauts plateaux pouvant atteindre les 3000 heures/an. C'est pour cette raison, qu'une enveloppe financière importante est allouée par le gouvernement Algérien à l'investissement dans ce potentiel en énergies renouvelables.

L'intérêt que l'Algérie porte au développement de ces énergies vertes contribue à :

- Diversifier les sources d'énergie
- Préserver les ressources primaires (économie des combustibles fossiles ; gaz et fuel,) et mise en valeur des ressources renouvelables.
- Protéger l'environnement par la réduction des émissions des gaz à effet de serre (réduction d'émissions de CO<sub>2</sub>).

Pour exploiter et développer ce potentiel au niveau du territoire national, il a été décidé de créer la société **SKTM « SHARIKET KAHRABA WA TAKET MOUTADJADIDA »** (filiale de production d'électricité de la holding Sonelgaz) d'une part, et pour la meilleure prise en charge des centrales isolées du sud du pays d'autre part.

## 2. Présentation de SKTM

### 2.1. Définition de SKTM

Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida, est une société de production d'électricité, dont le capital est souscrit entièrement par la holding Sonelgaz. Créée le 07 avril 2013, par scission de la société SPA, son siège social est basé à Ghardaïa.

La société est née dans un contexte de prise de conscience généralisée des incertitudes énergétiques et de la nécessité de lutter contre le réchauffement climatique, un recours massif à l'énergie solaire sous toutes ses formes, directes (photovoltaïque, thermique) ou indirectes (éolien, biomasse) doit s'imposer comme une priorité.

# Chapitre I : présentation de la société SKTM

---

## 2.2. Objectifs de SKTM

SKTM a été créée pour répondre à des enjeux stratégiques de l'heure. Il s'agit :

- Des spécificités qui caractérisent la gestion du parc de production Diesel des RIS (Réseaux Isolés du Sud).
- De satisfaire aux meilleures conditions de continuité et de qualité de service fournies aux populations des régions du sud du pays.
- De la volonté de concrétiser l'ambitieux programme national de développement des Energies Renouvelables, en mettant en valeur les potentialités énormes dont dispose notre pays, notamment l'étendue de son territoire et la durée d'ensoleillement.

## 2.3. Principale tâche de SKTM

SKTM a pour missions principales l'exploitation des réseaux d'énergie électrique isolés du sud (production d'électricité en conventionnel) et des énergies renouvelables pour l'ensemble du territoire national.

Le développement des infrastructures électriques du parc de production des Réseaux Isolés du Sud, de l'Engineering, de la maintenance et de la gestion des centrales électriques relevant de son champ de compétence.

La commercialisation de l'énergie produite pour les filiales de distribution notamment après le déploiement des Energies Renouvelables sur les réseaux interconnectés.

## 2.4. Réalisations et perspectives

**SKTM** a participé, dès sa création, aux côtés des autres filiales de métiers de base, avec un programme d'urgence visant à garantir un passage été 2013 sans incident majeurs, et assurer de la sorte une qualité et continuité de service irréprochable au profit des populations des régions du sud du pays.

L'été 2013 a été marqué par un apport en puissance additionnelle de 121,3 MW soit, 101MW en Turbines à gaz mobiles, 20,3 MW en groupes diesel et 22 MW de capacité récupérée grâce un plan de maintenance.

# Chapitre I : présentation de la société SKTM

---

Ce programme a ramené la capacité totale des réseaux isolés du sud à 336 MW, alors que la puissance maximale consommée n'a pas dépassé les 208 MW, ce qui a permis d'assurer une période estivale sans délestage, dans les régions du sud du pays.

Cet effort a été maintenu pour couvrir la puissance maximale requise pour l'été 2014, par l'apport en puissance additionnelle de l'ordre de 200,5 MW, en plus d'une réserve tampon.

L'année 2014 a été marquée également par la réalisation de 23 centrales solaires photovoltaïques, implantées dans les hauts plateaux et les régions du sud du pays, la mise en service de la centrale expérimentale de Ghardaïa, de la ferme éolienne d'Adrar, ainsi que 10 stations de mesures météorologiques.

## 3. Centrale photovoltaïque de Oued N'echou (Ghardaïa)

### 3.1. Description de la centrale

Cette centrale de puissance de 1,1 MWc a été réalisée comme une centrale pilote dans laquelle il a été utilisé les quatre (04) technologies de production d'électricité en énergie solaire (les panneaux poly cristallin, monocristallin, couche mince et l'amorphe, ainsi que la technologie mobile et fixe). Cette puissance est répartie comme suit : [1]

452 KWc : panneaux en silicium monocristallin

452 KWc : panneaux en silicium poly cristallin

100 KWc : panneaux en silicium amorphe (a-Si)

100 KWc : panneaux en couches minces (tellurure de cadmium CdTe)

20% des panneaux photovoltaïques seront disposés sur un système motorisé permettant le suivi de la trajectoire du soleil et l'augmentation de la production. Le reste des panneaux sont montés sur des supports fixes.

La répartition de la motorisation est comme suit :

- monocristallin et poly cristallin : 30% motorisés et 70 % fixes
- amorphe et le CdTe : 100% fixes

Les systèmes motorisés prévus sont de type simple axe. Ces systèmes mono axe sont des suiveurs solaire journalier. Ils suivent la course du soleil du matin au soir (suivi azimutal Est-

## Chapitre I : présentation de la société SKTM

---

Ouest) augmentant très fortement la production d'électricité par rapport à une installation fixe.

Les systèmes fixes ont pour inclinaison 42,29° par rapport à l'horizontale.

Chaque table comporte au maximum 13 m<sup>2</sup> de modules.

Cette centrale est destinée à renforcer le réseau existant mais aussi à évaluer le comportement des différents équipements et technologies photovoltaïques dans l'environnement du sud algérien.

**Les chiffres clés sont les suivants :**

Types de panneaux	Panneaux silicium monocristallin		Panneaux silicium poly cristallin		Panneaux silicium amorphe	Panneaux silicium couche mince	total
	Fixe	motorisé	fixe	motorisé			
Système	Fixe	motorisé	fixe	motorisé	fixe	fixe	
Puissance totale (KWc)	351		351		101	101	904
Puissance (KWc)	246	105	245	106	101	101	
Nombre total de modules	1848		1526		1344	804	5522
Nombre de modules	1296	552	1064	462	1344	804	

**Tableau (I.1) :** Données des différentes technologies photovoltaïques utilisées dans la centrale [1]

# Chapitre I : présentation de la société SKTM

## 3.2. Localisation

Cette centrale d'une superficie de 08 Ha, située à environ 15km au Nord de la ville de Ghardaïa ; près du village de Oued N'échou, est limitée par : [1]

**Nord** : Route Nationale N° 01

**Sud** : Terrain vague

**Est** : Terrain vague.

**Ouest** : Route Nationale N°01

**Coordonnées géographiques :**

Latitude : 32, 29°

Longitude : 3, 04°

Altitude : 468 m



**Figure (I.1) : Plan de situation de la centrale [1]**

## 3. 3. Historique

La centrale solaire photovoltaïque de Ghardaïa s'inscrit dans le cadre du programme de développement des énergies renouvelables mise en place par le ministère de l'énergie.

[1]

# Chapitre I : présentation de la société SKTM

---

-Le maitre d'ouvrage : la société de production d'électricité (SPE), a mandaté la compagnie de l'engineering de l'électricité et du gaz (CEEG).

-La fourniture et la supervision : ABB Italie.

-Le Montage : ETTARKIB.

-Génie Civil : SNC IDEAL BATISSE.

-Début des travaux Génie civil : 28/05/2012

-Début des travaux de montage par ETTARKIB : 22/08/2013

-La date de mise en service : 11/06/2014

## **3.4. Description technique de la centrale**

-Type d'installation : centrale en panneaux photovoltaïques.

-Puissance nominale crête :1100KWc.

-Nombre de panneaux photovoltaïques : environ 5220.

-Tension de sortie : 30KV.

-Energie primaire utilisée : Energie photovoltaïque (lumière du soleil).

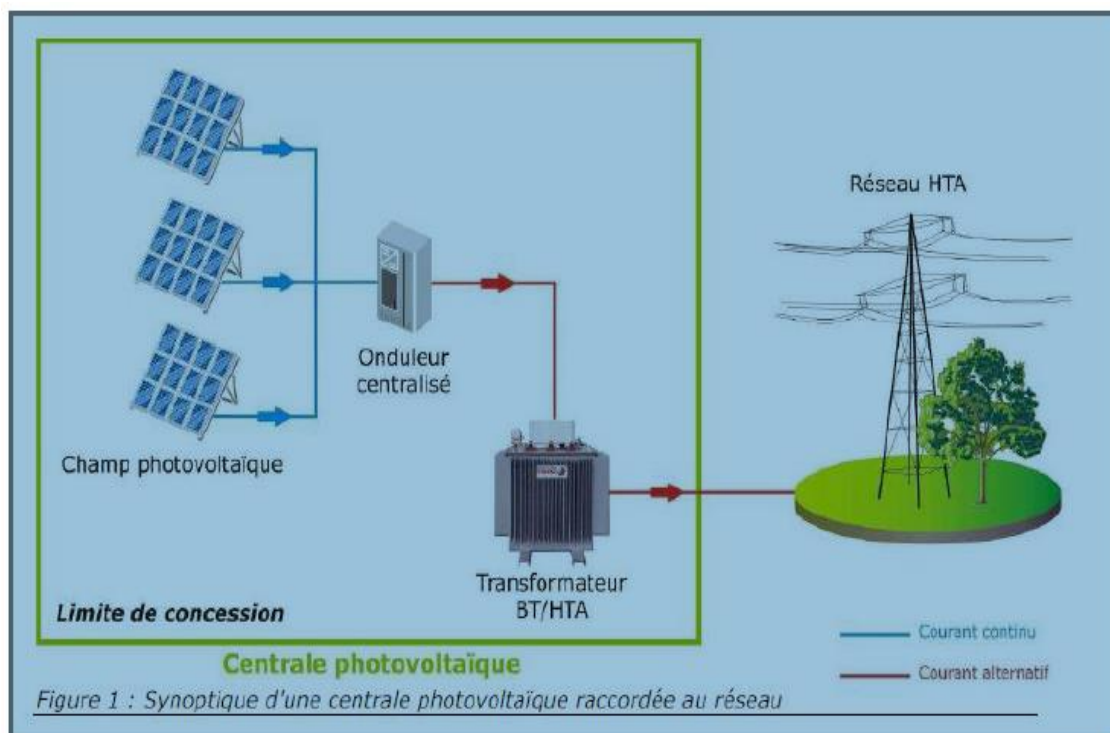
-Energie de secours le cas échéant : 160KVA maximum pour le système auxiliaire pendant la nuit ou en absence du soleil.

-Source d'énergie à utiliser (Energy supply Will be used) : l'énergie des systèmes auxiliaires est produite par la centrale elle-même. Pendant la nuit ou en absence du soleil ; l'énergie pour ces systèmes est prise du réseau de distribution moyenne tension. Dans le cas de black-out ; il est utilisé un système de batteries + groupe électrogène.

-La superficie destinée à la centrale : 5 hectares (total du terrain 10 hectares ; seulement la moitié est utilisée pour la centrale photovoltaïque).

## 4. Description d'un système photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque transforme directement le rayonnement solaire en électricité. Le courant continu produit par le générateur photovoltaïque est transformé en courant alternatif via l'onduleur. Ce courant alternatif sera injecté sur le réseau public de distribution. Pour des centrales photovoltaïques de puissance de raccordement supérieure à 250 KVA, la production d'électricité solaire est injectée sur le réseau Moyenne Tension (HTA) grâce à l'utilisation d'un transformateur BT/HTA entre l'onduleur centralisé et le réseau de distribution. [1]



**Figure (I.2)** : synoptique d'une centrale photovoltaïque raccordée au réseau [1]

Le système d'alimentation électrique photovoltaïque d'interconnexion au réseau possède des caractéristiques différentes au système photovoltaïque indépendant. En effet sous la lumière du soleil, le système d'alimentation électrique photovoltaïque produit l'électricité vers le réseau électrique. Alors que la nuit, ou à temps couvert ou sous la pluie, le système d'alimentation électrique photovoltaïque n'étant pas capable de satisfaire les besoins de charge, il s'alimente l'électricité auprès du réseau électrique. [1]

# Chapitre I : présentation de la société SKTM

## 4.1. Production et rendement de l'installation photovoltaïque

Types de panneaux	Panneaux silicium monocristallin		Panneaux silicium poly cristallin		Panneaux silicium amorphe	Panneaux silicium couche mince	total
	Fixe	motorisé	fixe	motorisé			
Puissance totale (KWc)	351		351		101	101	904
Puissance (KWc)	246	105	245	106	101	101	904
Nombre de modules total	1848		1526		1344	804	5522
Nombre de modules	1296	552	1064	462	1344	804	5522
Production (%)	76	78	77	79	83	80	
Production (MWh/an)	356	192	360	197	159	154	1418
Productible (KWh/KWc /an)	1447	1834	1470	1855	1574	1528	9708
onduleur	2 ond 100 KVA	1 ond 100 KVA	2 ond 100 KVA	1 ond 100 KVA	1 ond 100 KVA	1 ond 100 KVA	

**Tableau (I.2) : Bilan de production de l'installation photovoltaïque [1]**

# Chapitre I : présentation de la société SKTM

---

L'indice de performance (ou PR pour Performance Ratio) est une grandeur, définie par la communauté européenne (JRC/ISPRA), qui représente la part d'énergie effectivement produite par rapport à l'énergie qui serait produite par un système "parfait" fonctionnant en permanence sous les conditions de test standard (STC : irradiation de 1000 W/m<sup>2</sup>, température de module de 25°C et spectre solaire normalisé AM 1,5).

Ces résultats ont été obtenus avec les paramètres suivants :

- **Ombrage** : Les masques lointains sont inexistants.
- **Pertes thermiques** : Le coefficient de convection autour du module a été fixé à 29 W/m<sup>2</sup>.K. Il correspond à la valeur communément admise pour des capteurs « nus » avec circulation tout autour.
- **Pertes dues aux transformateurs élévateurs externes** : le raccordement au réseau s'effectuera en 30 KV. De ce fait, la présence de transformateurs élévateurs est indispensable. Les pertes dues aux transformateurs sont estimées à 0.1% pour les pertes fer et 1% pour les pertes résistives.
- **Pertes d'efficacité des modules** : par défaut, ces pertes sont estimées à 1%
- **Facteur d'encrassement** : ces pertes ont été estimées à 3%, justifiées par la présence de sable. L'encrassement peut diminuer sensiblement la production, notamment en période de pollinisation.

## 5. Conclusion

La centrale est située dans une région à fort potentiel solaire. De plus, ce parc solaire est riche en technologie de panneaux solaires photovoltaïques.

Avec un système motorisé, les modules photovoltaïques sont parfaitement orientés vers le soleil et produisent 25 % d'électricité en plus que des systèmes fixes idéalement inclinés.

L'installation est robuste et fiable au regard des conditions climatiques du site.

Le choix du fabricant s'est porté sur la capacité de l'installation à supporter des vents allant jusqu'à 150 km/h. [1]

Les systèmes retenus à un axe résistant à des vents de 200 km/h (supérieur aux exigences de la norme Eurocode EN 1991-1-4). Plusieurs anémomètres détectent les vents forts pour une commande automatique de la mise en position de sécurité des suiveurs. [1]

***CHAPITRE 2 : NOTIONS DE BASE***  
***SUR LE GISEMENT SOLAIRE***

# Chapitre II : notions de base sur le gisement solaire

---

## 1.Introduction

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 15000 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre ( $\text{KWc}/\text{m}^2$ ) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que ne consomme l'humanité en une année.

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, l'étoile la plus proche de la terre. La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et de chauffage, autant artisanale qu'industrielle. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre. Malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité considérable arrive à la surface du sol. On peut ainsi compter sur  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$  dans les zones tempérées et jusqu'à  $1400 \text{ W}/\text{m}^2$  lorsque l'atmosphère est faiblement chargée en poussière ou en eau. Le flux solaire reçu au niveau du sol terrestre dépend de plusieurs paramètres :

- ✓ L'orientation et l'inclinaison de la surface terrestre.
- ✓ La latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que de son altitude.
- ✓ La période de l'année.
- ✓ L'instant considéré dans la journée.
- ✓ La nature des couches nuageuses.

### Remarque :

Les zones les plus favorables sont répertoriées sous forme d'atlas et mettent en évidence des « gisements solaires » à la surface de la terre.

## 2.Rayonnement solaire

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1 391 000 km (100 fois celui de la Terre), sa masse est de l'ordre de

## Chapitre II : notions de base sur le gisement solaire

---

$2.10^{27}$  tonnes. Toute l'énergie du Soleil provient de réactions thermonucléaires qui s'y produisent.

Elles transforment à chaque seconde  $564.10^6$  tonnes d'hydrogène en  $560.10^6$  tonnes d'Hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie ( $E = mc^2$ ), ce qui représente une énergie totale de  $36.10^{22}$  KW.

La Terre étant à une distance de  $150.10^6$  km du Soleil, elle reçoit une énergie de  $1,8.10^{17}$  Watt. La valeur du flux de rayonnement solaire  $E$  reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne  $E_0$  est appelée la **constante solaire**, elle vaut  $E_0 = 1353 \text{ W.m}^{-2}$ . En première approximation, on peut calculer la valeur de  $E$  en fonction du numéro du jour de l'année par : [2]

$$E = E_0 [1 + 0,033 \cos (0,984 j)] \quad (\text{II.1})$$

$j$  : jour de l'année

### 3. Aspects géométriques

Nous allons nous intéresser ici au calcul du flux de chaleur radiatif reçu par un plan incliné placé à la surface de la Terre et orienté dans une direction fixée. La connaissance de ce flux est la base du dimensionnement de tout système solaire. [2]

#### 3.1. Systèmes de coordonnées

##### 3.1.1. Coordonnées terrestres

Tout point de la sphère terrestre peut être repéré par deux coordonnées, appelées coordonnées terrestres, à savoir sa latitude  $\varphi$  (positive dans l'hémisphère nord, négative dans l'hémisphère sud) et sa longitude  $L$  (positive à l'ouest, négative à l'est). [5]

##### a) La latitude $\varphi$

La *latitude* est une coordonnée géographique représentée par une valeur angulaire, expression de la position d'un point sur Terre (ou sur une autre planète), au nord ou au sud de l'équateur qui est le plan de référence. Elle est comptée de  $0^\circ$  à  $+90^\circ$  positivement dans l'hémisphère nord et négativement dans l'hémisphère sud.

## Chapitre II : notions de base sur le gisement solaire

### b) La longitude L

La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich 0°) et l'autre déterminé par le lieu envisagé. On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest. La longitude d'un lieu peut aussi être comprise entre -180° et +180°, à tout écart de 1° de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps. [ 7 ]

### C) Inclinaison $\beta$

C'est l'angle que forme le plan de capteur et l'horizontal du lieu.

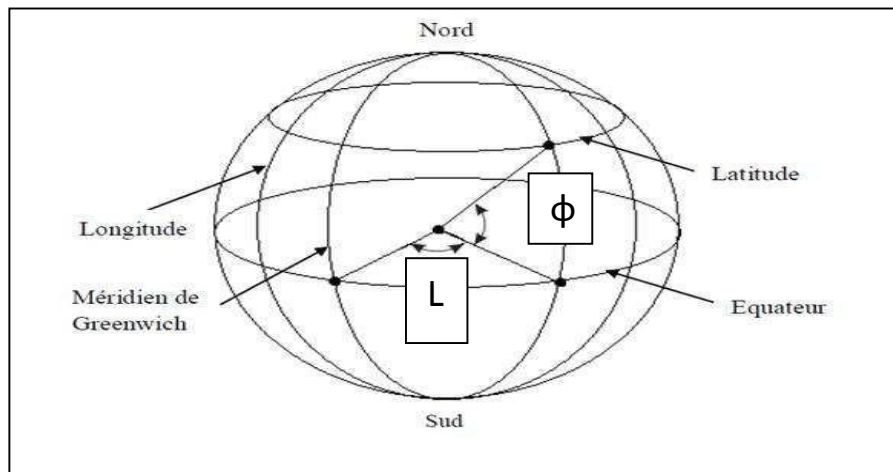


Figure (II.1) : Coordonnées terrestres. [7]

### 3.1.2. Coordonnées équatoriales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles ( $\delta$ ,  $\omega$ ).

#### a) La déclinaison $\delta$

C'est l'angle que forme la direction du soleil avec le plan équatorial.

La déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année : elle vaut 0 aux équinoxes et atteint ces deux valeurs extrêmes au solstice d'hiver (-23°,27') et au solstice d'été (+23°,27'). Elle est donnée par la relation suivante : [8]

$$\delta = 23,45 \times \sin [0,980 \times (n - 81)] \quad (\text{II.2})$$

$n$  : Numéro du jour de l'année à partir du 1er janvier.

## Chapitre II : notions de base sur le gisement solaire

---

### b) L'angle horaire $\omega$

L'angle horaire mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu quand le solaire est au zénith. Cet angle est formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un moment donné et la projection du Soleil sur ce même plan au midi solaire. Sa valeur est nulle à midi solaire, négative le matin et positive en après-midi et elle augmente de 15° par heure. Il varie entre -180° et +180°. [16]

$$\omega = 15 \times (\text{TSV}-12) \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$\omega$  : en degré

TSV : temps solaire vrai

### 3.1.3. Coordonnées horizontales

Dans ce système de coordonnées le soleil est repéré par sa hauteur  $h$ , son azimut  $\alpha$  et l'horizon astronomiques comme plan de référence. [9]

#### a) La hauteur du soleil $H$

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante :

$$\sin H = \sin \varphi \times \sin \delta + \cos \varphi \times \cos \delta \times \cos \omega \quad (\text{II.4})$$

#### b) L'azimut du soleil $\alpha$

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du Sud. Les azimuts varient de 0° à 360° de l'ouest vers l'est. Ils sont donnés par la formule suivante : [8]

$$\sin \alpha = \frac{\cos \delta \times \sin \omega}{\cos H} \quad (\text{II.5})$$

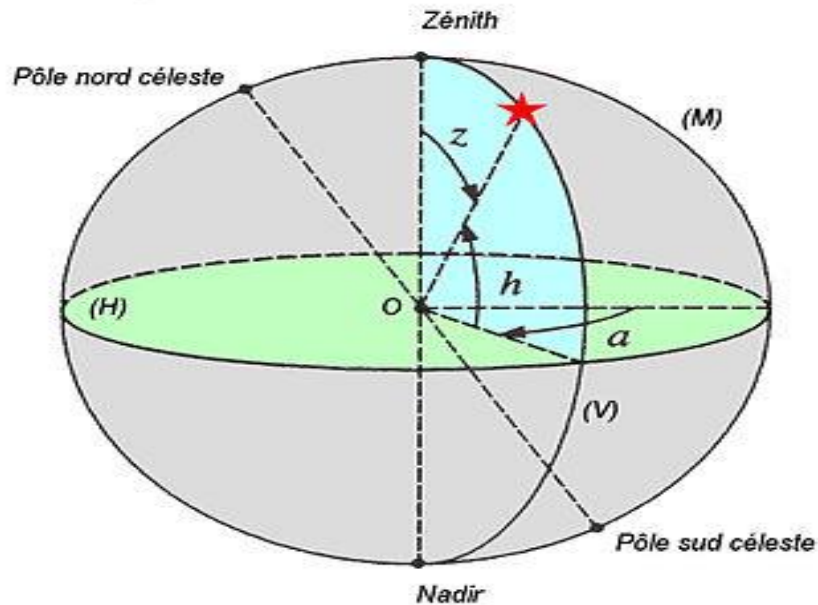


Figure (II.2) : Coordonnées horizontales

### 3.2. Mouvement de la terre

La trajectoire de la terre autour du soleil s'appelle « l'écliptique ». La distance terre soleil ne varie que  $\pm 1,7\%$  par rapport à sa valeur moyenne qui est de  $1,5 \cdot 10^8$  Km. Cette distance est minimale au début de janvier et maximale au début de juillet. On peut décomposer le mouvement de la terre en mouvements de rotation et de translation. [2]

#### a) Mouvement de rotation

La terre tourne autour de son axe de rotation (Pôle Nord, Pôle Sud) dans le sens trigonométrique. L'alternance des jours et des nuits est une manifestation immédiate de ce mouvement. On définit le jour solaire comme la durée moyenne entre deux passages consécutifs au méridien d'un lieu, ce jour est divisé en 24 intervalles égaux appelés heures. La rotation de la terre s'effectue avec une période de **23h 56mn 04s  $\approx 24$ h** et une vitesse linéaire de rotation de **0,465Km/s**. Les saisons n'existeraient pas si la terre se tenait droite, sur son orbite. Le fait que son axe de rotation est penché d'un angle de **23,45°** avec un mouvement de révolution, le pôle Nord et le pôle Sud vont pouvoir alternativement s'exposer au soleil. [3]

## Chapitre II : notions de base sur le gisement solaire

### b) Mouvement de translation

La terre est en rotation sur elle-même et elle effectue un tour complet au tour du soleil en 365 jours 5h 48mn 40s  $\approx$  365.25 jours. Elle décrit une orbite elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Cette orbite est située dans un plan appelé plan de l'écliptique où le soleil est presque au centre. Elle est légèrement aplatie, elle correspond à un cercle de rayon moyen de  $1,5 \cdot 10^8$  km. Cette distance est minimale au début janvier et maximale au début de Juillet. [3]

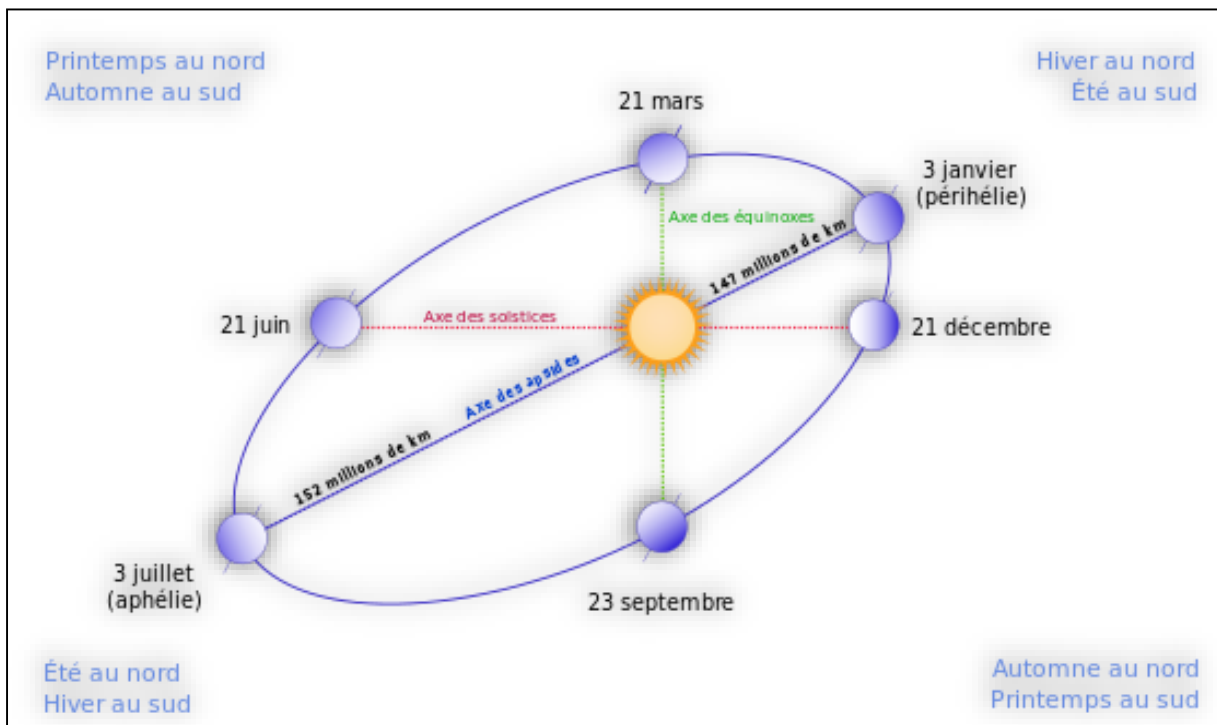


Figure (II.3) : Schématisation des mouvements de la Terre autour du soleil

### 3.3. Mouvement apparent du Soleil

Le mouvement apparent du Soleil vu par un observateur fixe en un point de latitude  $\phi$  au nord de l'équateur est représenté sur la figure (II.4).

Au midi solaire, l'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu est égal à  $(\phi - \delta)$ . La durée du jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12h entre le 21 mars et le 21 septembre. [2]

#### 3.3.1. Le midi solaire

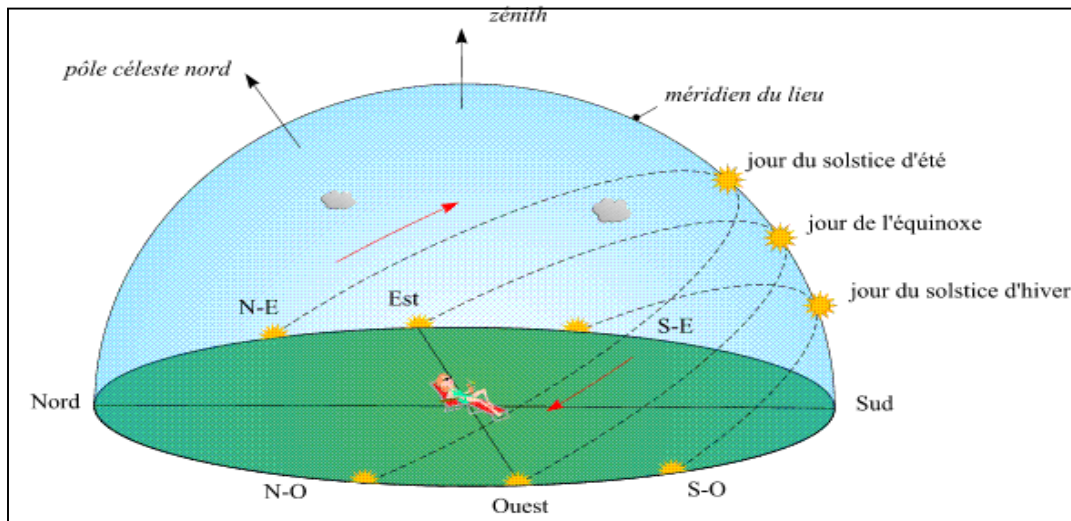
C'est l'instant où le Soleil atteint son point de **culmination**, en un endroit donné de la Terre ; à cet instant, son angle horaire est égal à zéro.

## Chapitre II : notions de base sur le gisement solaire

### ➤ La culmination

La culmination est le phénomène astronomique associé au passage d'un astre au méridien céleste d'un lieu donné. On distingue :

- La culmination supérieure, quand l'astre passe par son point de hauteur maximum.
- La culmination inférieure, quand l'astre passe par son point de hauteur minimum.



**Figure (II.4) :** Trajectoires apparentes du Soleil pour chacune de ces journées de l'hémisphère nord.

### 3.4. Durée et taux d'ensoleillement

#### a) Durée d'ensoleillement

Selon les conditions atmosphériques, le ciel peut être plus ou moins couvert de nuages au cours d'une journée. Ceux-ci occultent le Soleil, totalement ou Partiellement, empêchant ainsi le rayonnement d'atteindre directement le sol.

On appelle **durée effective d'ensoleillement** ou **insolation SS** le temps Pendant lequel, au cours d'une journée, le rayonnement solaire direct a atteint le sol du lieu considéré.

#### b) Taux d'ensoleillement

Par ciel clair sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant toute la durée du jour, ou plus précisément pendant la durée maximale d'ensoleillement **SSo**.

On appelle taux d'ensoleillement ou taux d'insolation le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement. :

$$\sigma = \frac{SS}{SSo} = \frac{\text{durée d'insolation}}{\text{durée d'insolation maximale}} \quad (\text{II.6})$$

## Chapitre II : notions de base sur le gisement solaire

---

### C. Calcul de la durée d'ensoleillement

A chaque réception d'une donnée du capteur de luminosité, les calculs sont effectués pour calculer le seuil théorique de radiation solaire. Si la valeur de radiation solaire mesurée est supérieure ou égale à 75% de la radiation solaire théorique alors on peut en conclure que le temps est ensoleillé.

A noter que ce calcul d'ensoleillement ne s'applique uniquement que lorsque l'inclinaison du soleil est supérieure à 3°. En effet, à l'approche du levé/couché du soleil, on atteint les limites de précisions de ces calculs.

## 4. Aspects énergétiques

### 4.1. L'atmosphère terrestre

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches de caractéristiques différentes, ce sont :

- La troposphère, entre le sol et 15 km d'altitude.
- La stratosphère entre 15 et 80 km d'altitude.
- L'ionosphère entre 80 et 200km d'altitude.

Les caractéristiques absorbantes de l'atmosphère sont déterminées par la présence de :

- CO<sub>2</sub> (0,03%).
- Vapeur d'eau : en quantité variable caractérisé par l'épaisseur d'eau condensable qui est l'épaisseur d'eau que l'on obtiendrait en condensant toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.
- Ozone (O<sub>3</sub>) située entre 10 et 30 km d'altitude.
- Aérosols : grains de sable, poussières, fumées...

### 4.2. Caractéristiques du rayonnement solaire

#### 4.2.1. Composition

Le rayonnement solaire se compose de radiations électromagnétiques émises par le soleil, dont le spectre s'étend des plus petites longueurs d'ondes (rayons gamma) vers les grandes ondes radioélectriques. Les parties de ce spectre qui jouent un rôle dans l'interaction du rayonnement solaire avec l'environnement terrestre sont essentiellement les bandes infrarouges, visibles et ultraviolettes, ainsi que la gamme radioélectrique et celles des microondes lorsque ce rayonnement traverse l'atmosphère pour atteindre la surface terrestre, il est fortement atténué en raison des phénomènes d'absorption et de diffusion par

## Chapitre II : notions de base sur le gisement solaire

les différents constituants de celle-ci. On trouvera sur la figure (II.5) la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre avec indication des gaz partiellement opaques qui filtrent ce rayonnement selon la longueur d'onde. [9]

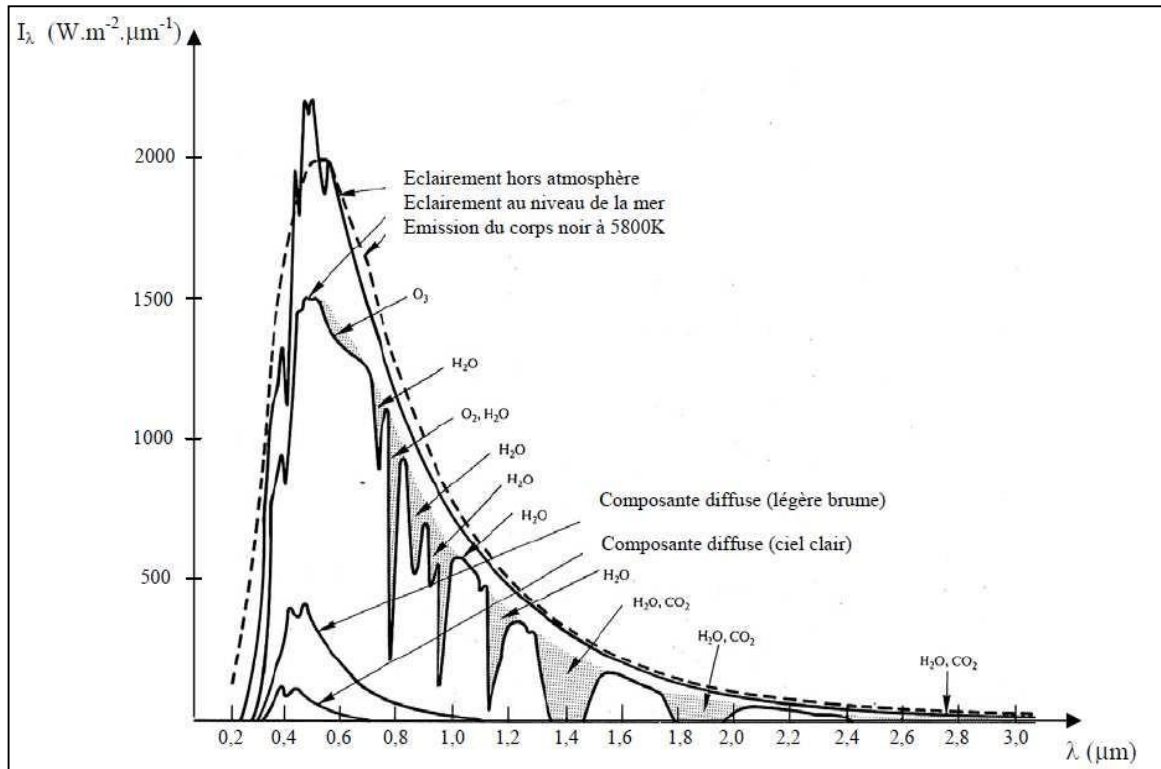


Figure (II.5) : Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre

### 4.2.2. Dualité de la lumière

La lumière peut être considérée sous forme d'ondes électromagnétiques de longueur d'onde  $\lambda$  ou sous forme de photons, corpuscules possédant une énergie  $E$  liée à  $\lambda$  par la relation suivante :

$$\mathbf{E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

**h** : Constante de Planck [j.s].  $h = 6,62607004 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$

**C** : Vitesse de la lumière dans le vide [ $\text{m.s}^{-1}$ ].  $C = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

**$\nu$**  : fréquence [ $\text{s}^{-1}$ ]

**$\lambda$**  : Longueur d'onde [m]

## Chapitre II : notions de base sur le gisement solaire

---

La notion de dualité onde/corpuscule est importante pour comprendre les phénomènes d'interaction entre un rayonnement et un matériau. Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre  $0,2\mu\text{m}$  (ultra-violet) et  $4\mu\text{m}$  (infrarouge) avec un maximum d'énergie pour  $0,5\mu\text{m}$ . 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre  $0,2\mu\text{m}$  et  $2,5\mu\text{m}$ . De  $0,4\mu\text{m}$  à  $0,78\mu\text{m}$ , le spectre correspond au domaine du visible.

Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons.

Pour que le rayonnement solaire produit un courant électrique dans un matériau donné, il faut qu'un électron lié à son atome (bande de valence) soit arraché pour participer à la conduction du courant, donc il faut lui fournir une énergie minimale (seuil d'énergie) afin qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (la bande de conduction) : c'est l'énergie du gap optique ou largeur de bande interdite  $E_g$ , exprimée en eV. Cette valeur seuil est propre à chaque matériau en raison de la structure électronique différente de chaque type d'atomes. Elle est de 1,1 eV pour le silicium cristallin et de 1,7 eV pour le silicium amorphe. Dans le cas du silicium, l'énergie minimale nécessaire correspond à l'énergie des photons ayant une longueur d'onde inférieure à  $1,1\mu\text{m}$ .

### 4.3. Types du rayonnement solaire

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit. De ce fait le rayonnement solaire peut se décomposer en plusieurs catégories définies comme suites :

- **Le rayonnement direct** : est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.
- **Le rayonnement diffus** : est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules Solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.
- **Le rayonnement réfléchi** : C'est la fraction du rayonnement incident diffusée ou réfléchi par le sol et les nuages. Ce terme étant généralement réservé au sol, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possible. Par définition ; le corps noir possède un albédo nul.
- **Le rayonnement global** : est la somme du rayonnement direct, diffus et réfléchi. [2]

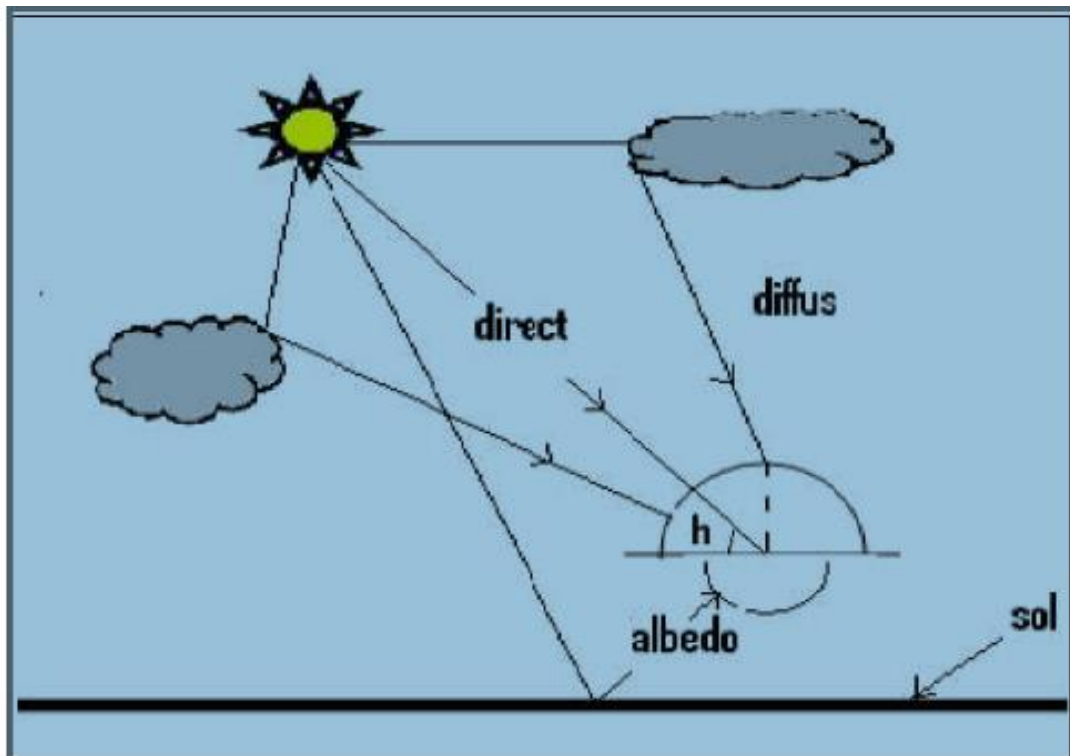


Figure (II.6) : Différents composants du rayonnement.

### 5. Mesure du rayonnement solaire

Les figures suivantes présentent les appareils de mesure pour les différents types de rayonnement :



**Héliographe**

*Mesure la durée d'insolation SS*



**Pyranomètre**

*Mesure l'irradiation  
directe et réfléchi*



**Pyrhéliomètre**

*Mesure l'irradiation directe*



**Pyranomètre**

*Mesure l'irradiation diffuse*

**Figure (II.7) :** Différents appareils de mesure du rayonnement solaire. [9]

### 6. Conclusion

Les données météorologiques concernant le rayonnement solaire ne sont généralement pas suffisantes pour pouvoir quantifier tous les phénomènes qui se produisent lorsqu'un panneau photovoltaïque reçoit de la lumière. Une bonne connaissance du gisement solaire s'avère nécessaire.

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur le gisement solaire, comme le mouvement de la terre autour de soleil et les coordonnées terrestres.

Enfin, nous avons présenté les différents appareils de mesure du rayonnement avec ses différentes composantes.

**CHAPITRE 3 : PRINCIPE DE  
FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE  
PHOTOVOLTAÏQUE**

# Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

---

## 1. Introduction

L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839. Le mot « photovoltaïque » vient du mot « photo » (du grec « phos » qui signifie « lumière ») et du mot « Volt » (patronyme du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité).

Le développement des cellules solaires a suivi les progrès de l'industrie des semi-conducteurs, en particulier ceux de l'industrie du silicium qui constitue le principal matériau à partir duquel sont fabriquées les cellules. Les premières cellules ont été conçues pour permettre une alimentation électrique fonctionnant plusieurs années sur les satellites. De grandes sociétés de l'électronique se sont au début intéressées à cette technologie pour alimenter des sites isolés (mesures, télécommunications, balises...) avant que les successifs chocs pétroliers relancent leur intérêt dans les années soixante-dix. A partir de cette période, des sociétés spécialisées dans ce domaine se sont créées, tout d'abord aux USA, ensuite au Japon et en Europe.

La technologie des cellules au silicium est maintenant bien maîtrisée et les nouveaux développements se concentrent sur l'amélioration du rendement et l'abaissement des coûts de fabrication. En parallèle avec ces produits existants, de nouvelles cellules, utilisant des phénomènes proches de la photosynthèse, pourraient apparaître sur le marché dans la prochaine décennie si les développements prometteurs obtenus en laboratoire se concrétisent par des produits industriels.

## 2. La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

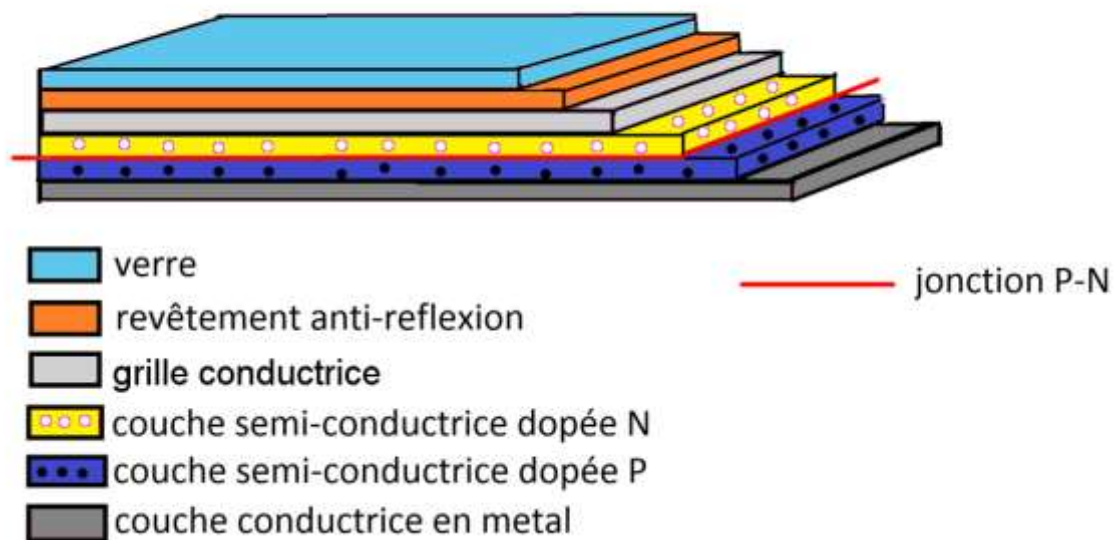
Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- ✓ D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent pas franchir sans excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électriques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité relativement bonne.
- ✓ D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.

# Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

- ✓ D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.

Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissantes juste en dessous de semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.



**Figure (III.1)** : structure basique d'une cellule solaire. [30]

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule. [10]

## 3. Conversion photovoltaïque

### 3.1. Semi-conducteur

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité électrique est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin. Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique.

[11]

# Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

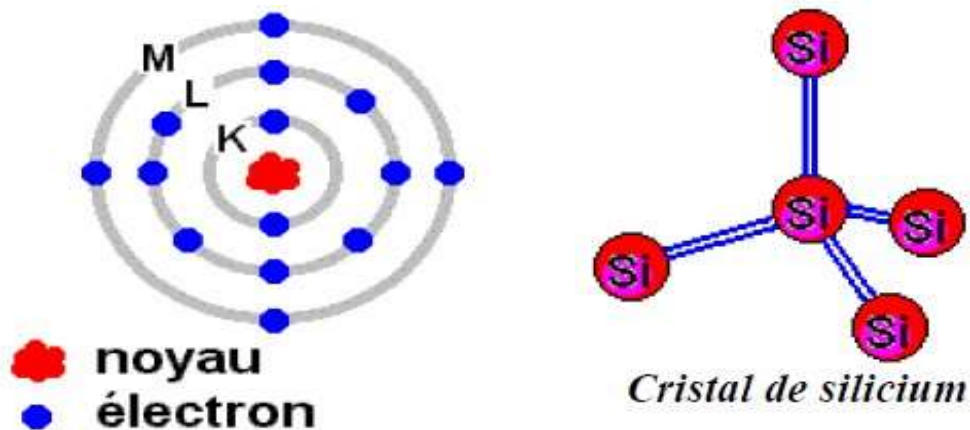


Figure (III.2) : le semi-conducteur (silicium).

## 3.2. Le dopage de semi-conducteur

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage.

### a) Dopage de type N

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent (phosphore p). Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième reste disponible, il sera excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif). [11]

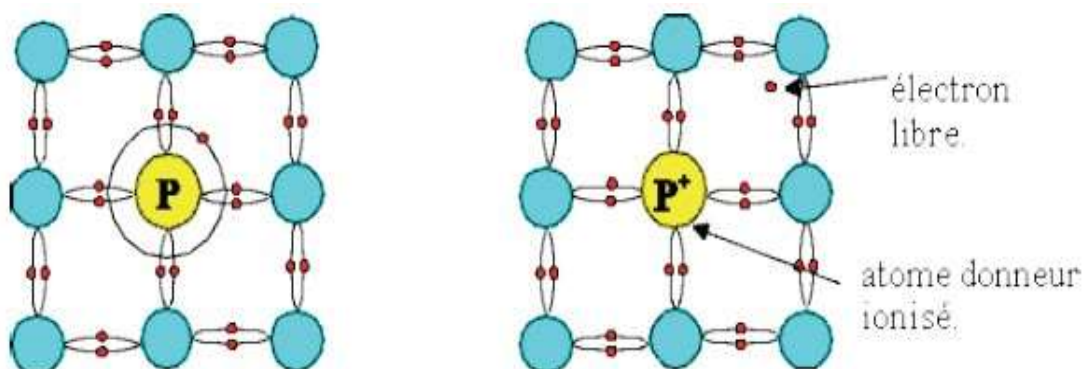


Figure (III.3) : dopage de semi-conducteur de type n. [11]

# Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

## b) Dopage de type P

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant.

Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore B. [11]

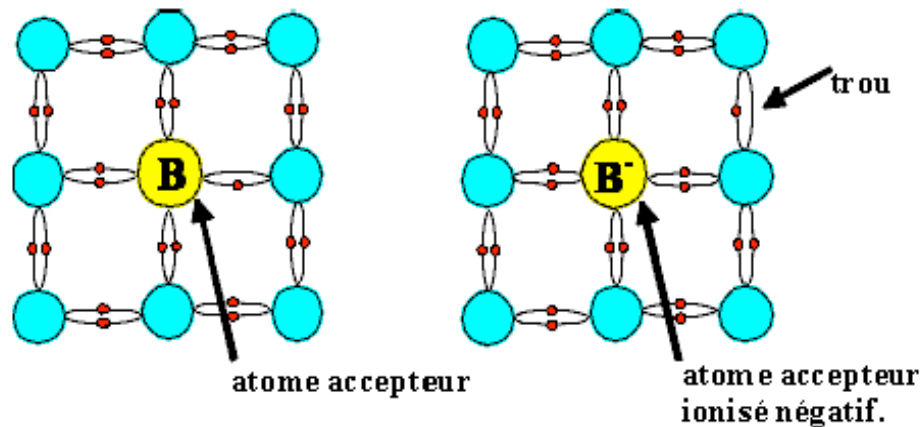
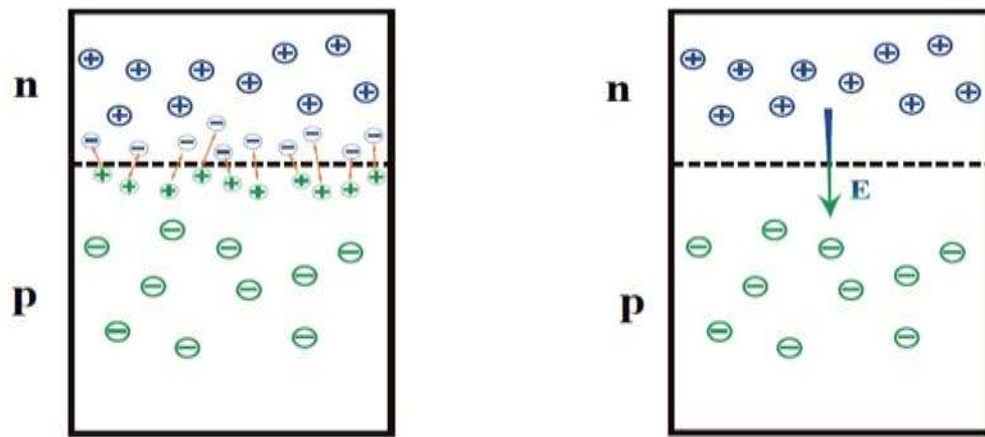


Figure (III.4) : dopage de semi-conducteur de type p. [11]

## 3.3. La Jonction PN

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopé P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition. Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner. [11]

# Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque



a) - Migration des charges mobiles vers le plan de jonction.

b) - Champ électrique E résultant, dû aux charges fixes.

**Figure (III.5) :** La jonction p-n.

## 4. Effet photovoltaïque

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photovoltaïque, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charges (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbée permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires électrons-trous, qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise.

Si on illumine maintenant une jonction PN représenté sur la figure (III.5), les paires électrons-trous qui sont créés dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction (photo tension), s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque. [3]

# Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

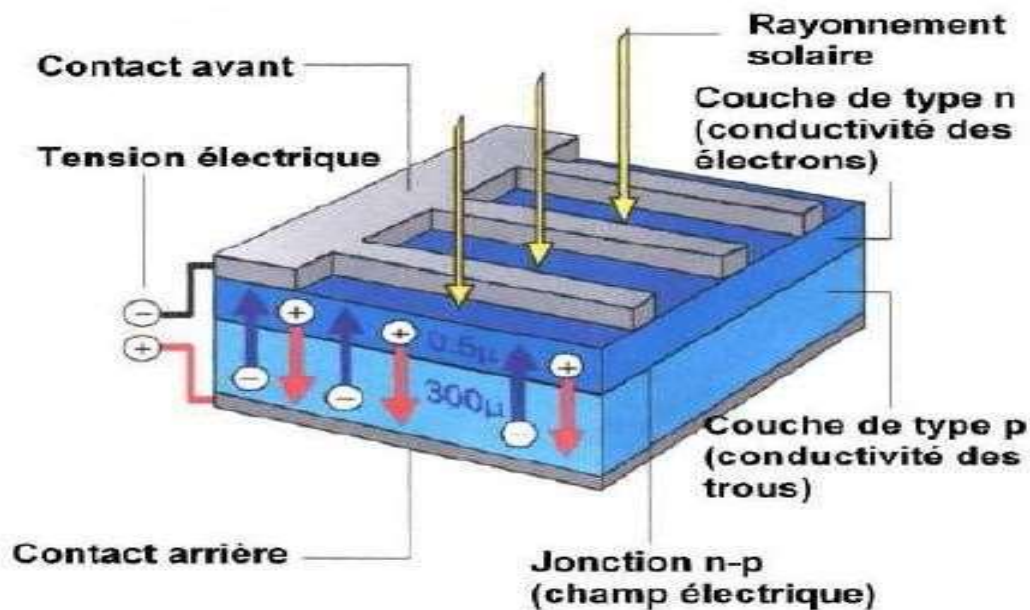


Figure (III.6) : l'effet photovoltaïque.

## 5. Principe de fonctionnement

Pour créer un courant électrique dans un semi-conducteur, il faut lui fournir une énergie qui permet d'extraire des électrons de la bande de valence pour les transférer dans la bande de conduction, soit une énergie supérieure au gap de la bande interdite. La lumière dont les photons transportent une énergie :  $E = h\nu$  permet d'atteindre cet effet : c'est l'effet photovoltaïque.

La lumière pénétrant dans un semi-conducteur permet donc, si son énergie est supérieure au gap de faire passer le semi-conducteur de l'état isolant à l'état conducteur, ce phénomène augmente lorsque la température du semi-conducteur s'élève. Lorsqu'un électron est extrait de la bande de valence pour passer dans la bande de conduction, il laisse derrière lui une vacance ou un trou à sa place, alors un autre électron proche de la bande de valence peut combler ce trou et laisser derrière lui à son tour un trou, on aura ainsi établi un courant de trous. Les deux types de courant ne seront pas différenciés, on parlera simplement de courant, qu'il s'agisse d'électrons ou de trous.

De même on dit que l'absorption de l'énergie des photons par le semi-conducteur crée des paires de porteurs électron-trou. L'effet photoélectrique modifie simplement la conductivité électrique de certains semi-conducteurs, ceci est utilisé pour fabriquer des résistances dépendant de la lumière, composants largement utilisés dans les appareils

# Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

photographiques et partout où la lumière doit être mesurée. Pour transformer le semi-conducteur photosensible de composant passif en composant actif, il faut pouvoir générer un courant de porteurs, donc apporter une force qui obligera les électrons et les trous à s'écouler dans deux directions opposées. Cette force sera réalisée par un champ électrique interne provenant du dopage du semi-conducteur. [12]

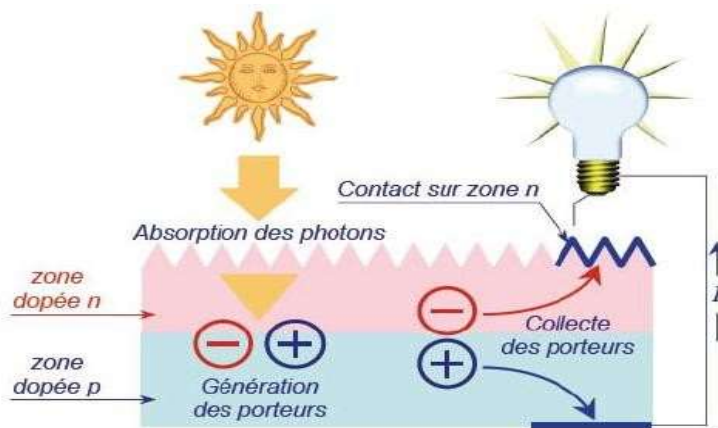


Figure (III.7) : le principe de fonctionnement d'une cellule PV.

## 6. Les types des cellules photovoltaïques

Les différentes techniques utilisées de nos jours, ont permis de mettre au point divers types de cellules au silicium : monocristallin, poly-cristallin, amorphe.

Il existe aussi d'autres types de cellules qui utilisent d'autres types de matériaux.

### a) Cellule en silicium monocristallin

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grandes dimensions. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme. Les cellules monocristallines sont les plus commercialisées offrant un bon rendement électrique compris entre 10% et 17%, mais font appel à une méthode de production plus complexe et donc coûteuse.

En effet, l'obtention d'un cristal pur nécessite une grande quantité d'énergie. [13]

## Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

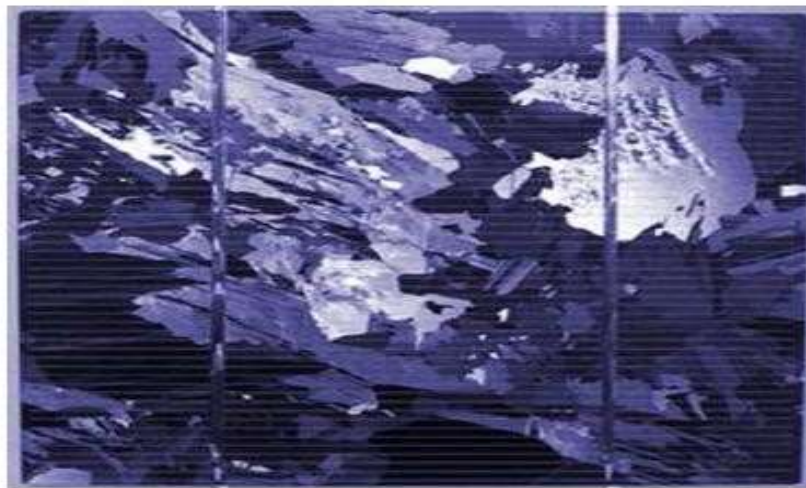
---



**Figure (III.8) :** Cellule photovoltaïque monocristalline.

### b) Cellule en poly-cristallin

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux. Les cellules poly-cristallines ont un rendement électrique compris entre 11% et 15%. Leur procédé de fabrication consomme moins d'énergie. Elles ont ainsi un coût de production plus faible mais un rendement légèrement inférieur à celui des cellules monocristallines. [13]



**Figure (III.9) :** Cellule photovoltaïque poly-cristallin.

### c) Cellule amorphe

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est marronne. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires », leurs coûts de fabrication sont les plus intéressants, mais elles ont un rendement compris entre 5 et 7%. [13]

# Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

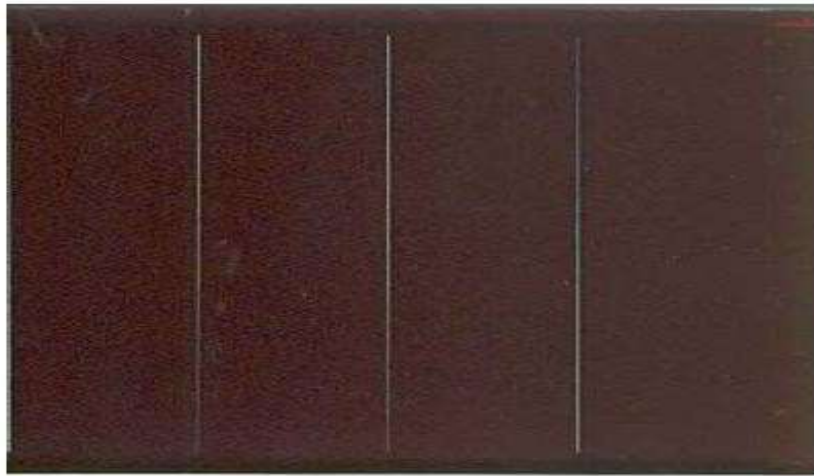


Figure (III.10) : Cellule photovoltaïque amorphe.

## 7. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Il existe de nombreuses familles et sous familles de cellules photovoltaïques qui diffèrent chacune de la nature du semi-conducteur et du procédé de fabrication. Cependant, les propriétés électriques des cellules photovoltaïques sont semblables d'une technologie à une autre. Dans le but de savoir dimensionner une installation photovoltaïque, il apparaît essentiel de comprendre et d'assimiler le comportement électrique des cellules photovoltaïques, et par similitude celui des modules photovoltaïques qui constitueront le générateur.

### 7.1. Zones de fonctionnement du module photovoltaïque

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'éclairement et de façon générale des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée.

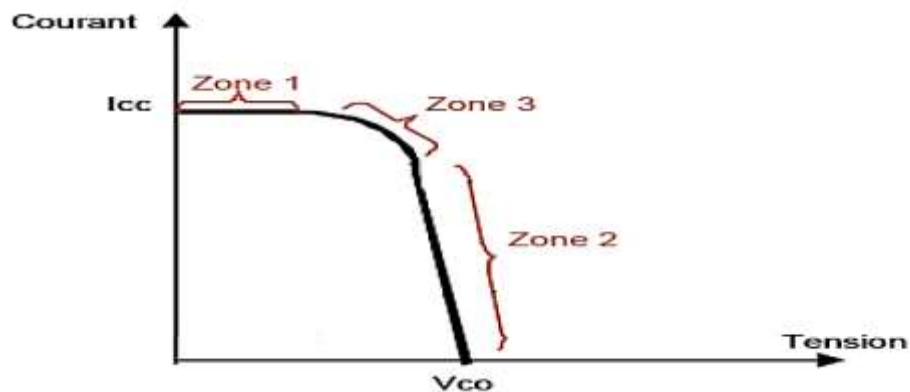


Figure (III.11) : les différentes zones de la caractéristique I (V).

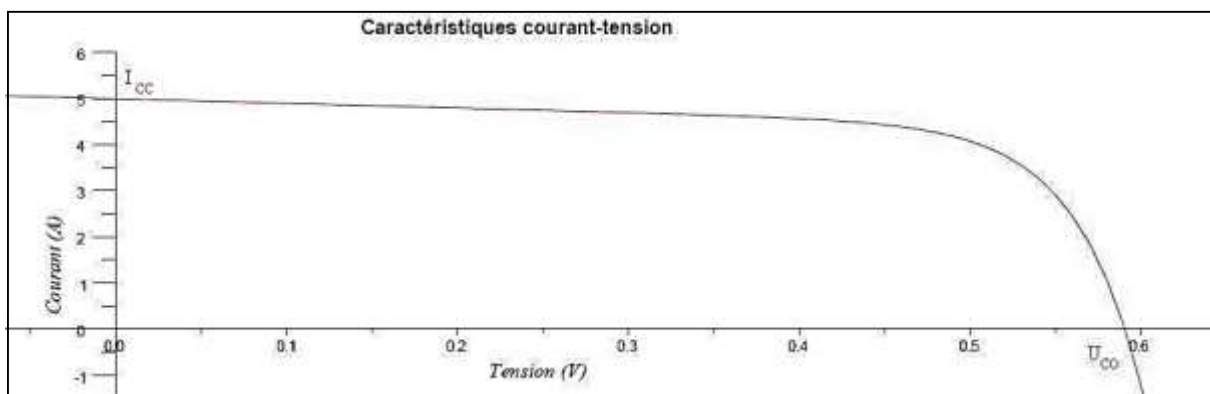
# Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique d'un générateur photovoltaïque constitué de plusieurs cellules à une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire. Nous pouvons décomposer la caractéristique  $I(V)$  d'un générateur PV en trois zones :

C'est dans la zone 3 que se situe le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. Ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par couple  $(I_{opt}, U_{opt})$ , et seule une charge appropriée permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions considérées. [15]

## 7.2. Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

La puissance électrique délivrée par une cellule photovoltaïque est le produit de la tension par le courant qu'elle génère. Ces deux grandeurs, courant et tension, dépendent à la fois des propriétés électriques de la cellule mais aussi de la charge électrique à ses bornes. Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension. Tout dipôle électrique est entièrement défini par sa caractéristique courant-tension, qui lui est propre. Une cellule photovoltaïque, en tant que **dipôle électrique**, dispose de sa propre caractéristique courant-tension, ainsi qu'illustré ci-dessous :



**Figure (III.12) :** Courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque [15]

Cette caractéristique courant-tension est une relation entre la tension et le courant délivrés par la cellule photovoltaïque. Deux données importantes sont à relever : [15]

### a) Le courant de court-circuit $I_{cc}$

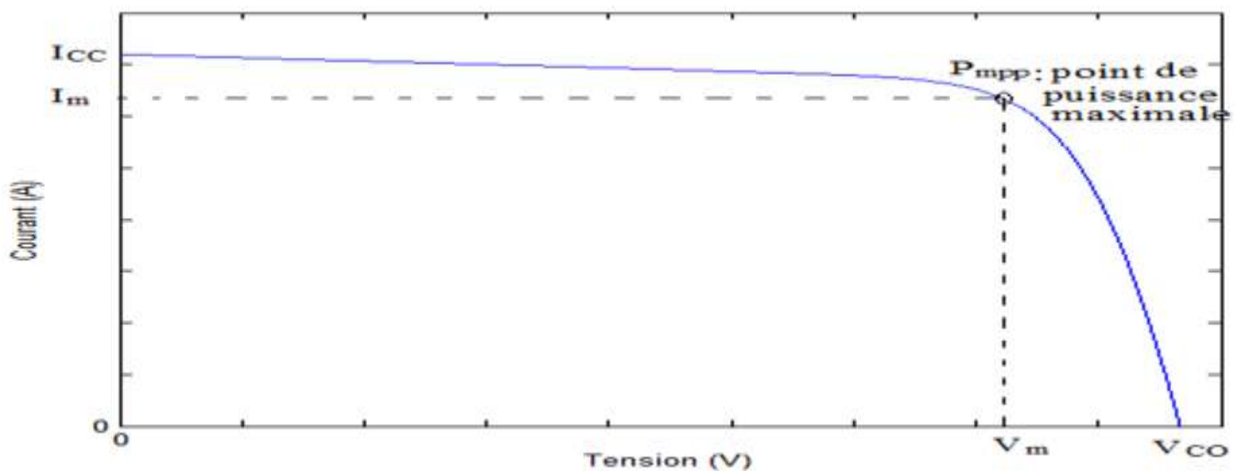
Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est en court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle + est relié au pôle - (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule :  $(P = U \times I)$  est nulle.

# Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

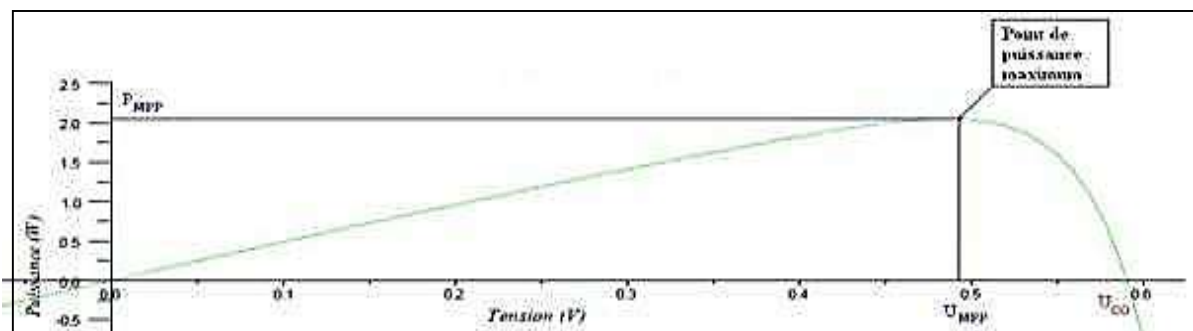
## b) La tension en circuit ouvert $U_{CO}$

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle (+) et le pôle (-) sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule ( $P = U \times I$ ) est nulle. La puissance fournie par la cellule est tout simplement le produit du courant et de la tension. A partir de la caractéristique courant-tension, il est intéressant de dessiner le graphe de la puissance ( $P = U \times I$ ) en fonction de la tension  $U$ , qu'on appelle aussi caractéristique puissance-tension. La caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque met en évidence un point de puissance maximum **P<sub>MPP</sub>** (**MPP** signifie en anglais **Maximal Power Point**, soit **Point de Puissance Maximale**). Ce point de puissance maximale est le produit d'un courant et d'une tension donnés. On appelle respectivement **I<sub>MPP</sub>** et **U<sub>MPP</sub>** le courant et la tension correspondant au point de puissance maximale, c'est-à-dire tel que :

$$I_{MPP} \times U_{MPP} = P_{MPP} \tag{III.1}$$



**Figure (III.1)** Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire photovoltaïque. [31]



**Figure (III.14) :** Caractéristique puissance tension d'une cellule photovoltaïque [9]

# Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Pour caractériser une cellule photovoltaïque on aura besoin de 4 paramètres majeurs sont :

- ✓ Le courant de court-circuit noté  $I_{cc}$
- ✓ La tension à vide notée  $U_{co}$
- ✓ Le courant de puissance maximale noté  $I_{MPP}$
- ✓ La tension de puissance maximale notée  $U_{MPP}$

La valeur des 4 paramètres ci-dessus dépend d'un certain nombre de paramètres

Dont :

- Le niveau d'éclairement de la cellule.
- La température de la cellule [9]

## 7.3. Influence de la température et de l'éclairement

La caractéristique d'une cellule photovoltaïque (ou d'un générateur photovoltaïque) est directement dépendante de l'éclairement et de la température. Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température maintenue constante 25 °C, la Figure (III.15), montre clairement l'existence de maxima sur les courbes de puissance correspondantes aux Points de Puissance Maximale  $P_{max}$ .

Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit  $I_{cc}$  varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert  $U_{co}$  (à vide) varie très peu.

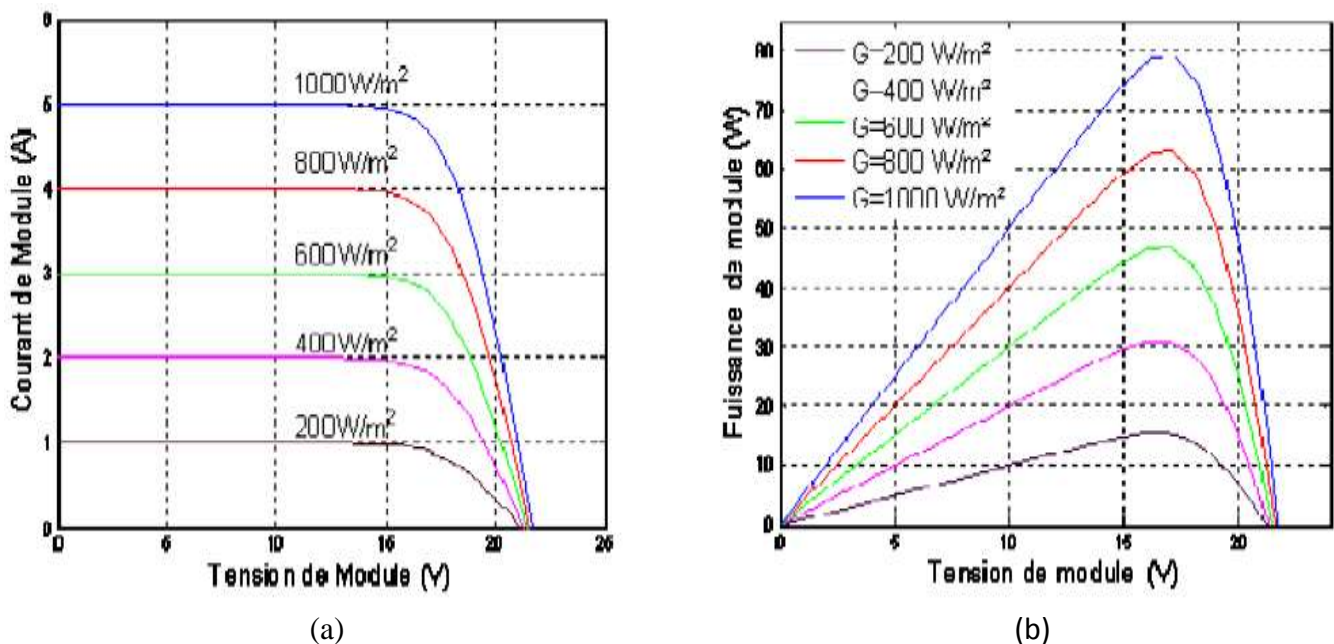
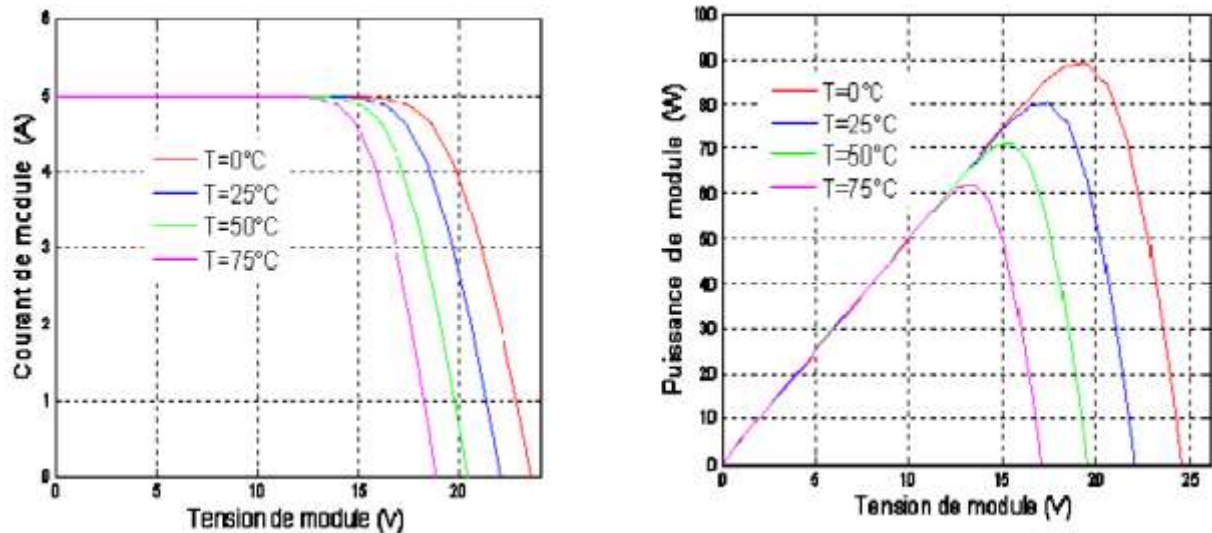


Figure (III.15) : Evolution de la caractéristique  $I(V)$  (a) et  $P(V)$  (b) en fonction de l'irradiation. [3]

# Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires. La température a également une influence sur la caractéristique d'un générateur PV. La figure (III.16) présente la variation des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque en fonction de température à un éclairement donné. L'éclairement est ici fixé à  $1000\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . [3]



**Figure (III.16) :** Evolution de la caractéristique I(V) (a) et P(V) (b) pour différentes Températures [3]

Par contre, si la température croît à irradiation constante, la tension à vide  $U_{CO}$  décroît avec la température. Plus la température est élevée plus  $U_{CO}$  est faible et le courant de court-circuit  $I_{CC}$  augmente avec la température. Cette hausse est nettement moins importante que la baisse de tension.

L'influence de la température sur  $I_{CC}$  peut être négligée dans la majorité des cas. La température et l'éclairement sont donc les deux principaux paramètres qui vont modifier la caractéristique d'un générateur photovoltaïque. Ces deux paramètres devront donc être étudiés avec soin lors de la mise en place d'une installation PV.

## 7.4. Facteur de forme (FF)

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) d'une cellule ou d'un générateur PV, c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle ( $I_{CC}\times U_{OC}$ ). Plus la valeur de ce facteur sera grande,

## Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

---

plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales.

Il définit par la relation suivante : [14]

$$FF = \frac{P_{max}}{U_{max} \times I_{cc}} \quad (III.2)$$

Avec :

$$P_{max} = I_{max} \times U_{max}$$

### 7.5. Rendement des modules photovoltaïques

Le rendement indiqué sur les fiches techniques des modules est le rendement dans les Conditions Standard de test (niveau d'éclairement  $P_i=1000W/m^2$ , Température de cellule  $25^\circ C$ ). Il vaut : [9]

$$\eta_m = \frac{PCU}{E_{nom} \times S_m} \quad (III.3)$$

Avec :

$P_{CU}$  : puissance crête unitaire d'un module photovoltaïque en [Watt].

$S_m$  : surface du module photovoltaïque en  $[m^2]$ .

$E_{nom}$  : éclairement nominal standard égal à  $1000W/m^2$

# Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

## 8. Les différents composants d'un système solaire photovoltaïque

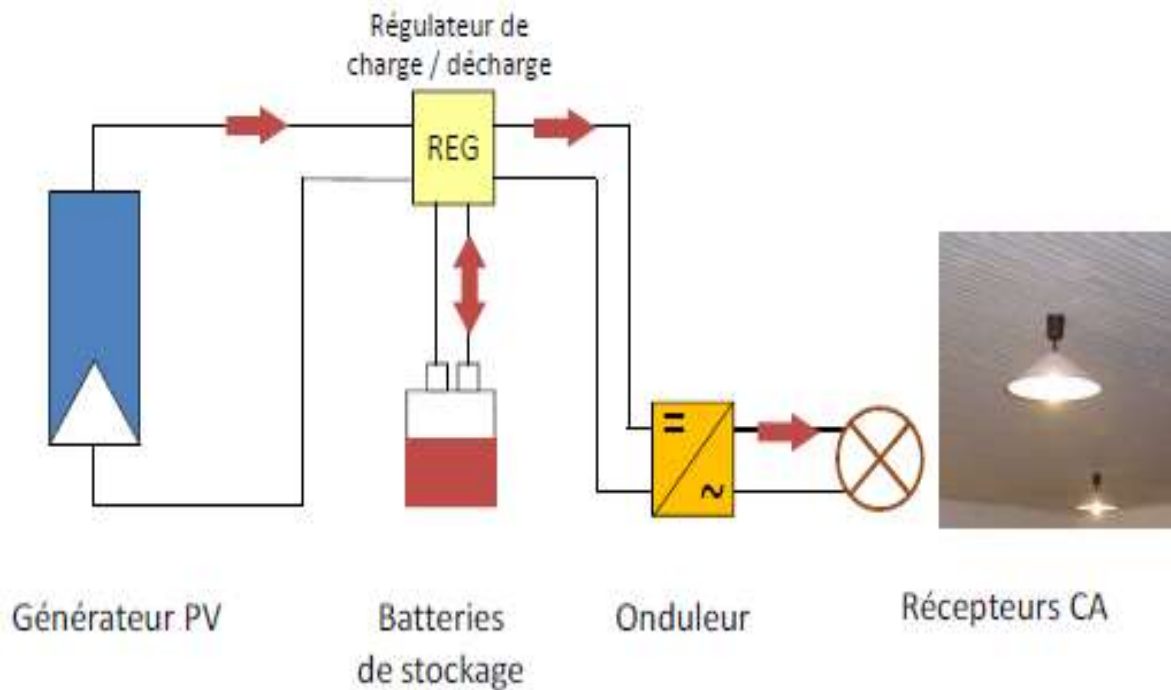


Figure (III.17) : les différents composants d'une installation photovoltaïque [24]

### 1. Batteries

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques s'effectue exclusivement à l'aide des batteries d'accumulateurs.

Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions importantes :

**a) Autonomie :** Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux.

**b) Courant de surcharge :** Une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV. Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.

**C) Stabilisation de la tension :** Une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée.

# Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

## 1.1. Types d'accumulateurs :

Plusieurs types d'accumulateurs sont en vente sur le marché. Le plus connu et le plus utilisé dans le photovoltaïque C'est l'accumulateur au plomb.

### ➤ Les Accumulateurs au plomb acide

Il s'agit de la technologie la plus utilisée dans les systèmes solaires autonomes. Elle offre actuellement la meilleure réponse en termes de prix et la durée de vie. De plus, elle présente les caractéristiques les plus recherchées d'une batterie solaire, à savoir un rendement élevé, une durée de vie longue avec un grand nombre de cycles et une autodécharge faible. Par contre, les batteries nickel-cadmium sont plus chères, elles sont utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale. [17]

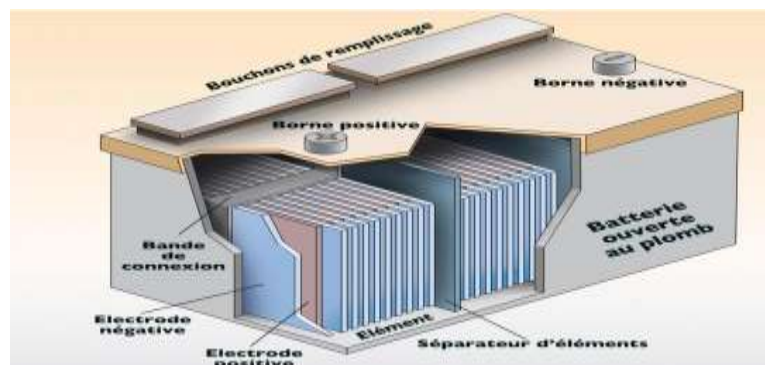


Figure (III.18) : batterie ouverte au plomb

### ➤ Les Accumulateurs au Nickel - cadmium

Les batteries de nickel -Cadmium ont une structure physique semblable à celle du plomb-Acide. Au lieu du Plomb, elles utilisent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives. L'électrolyte est de l'hydroxyde de Potassium.

La tension de ce type d'accumulateur varie entre 1,15 et 1,17 Volts, par élément suivant l'état de charge. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70%. En dépit d'un prix encore prohibitif. Ce type d'accumulateur présente beaucoup d'avantages :

- Très bonne résistance mécanique.
- Possibilité de supporter des décharges profondes.
- Pas d'émanations toxiques à partir de l'électrolyte.
- Ne craint pas de gel. [16]

# Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

## ➤ Les Accumulateurs NiMH (Nickel-Métal-Hydrure)

Ces batteries remplacent les NiCD car elles sont moins toxiques. Elles sont cependant assez chères et sont utilisées dans les installations haute gamme. Leur durée de vie est beaucoup plus grande que celle des batteries au plomb (50% de plus) mais leur capacité est extrêmement faible (quelques Ah au maximum).[19]

## ➤ Les Accumulateurs Li-ion (Lithium-ion)

- Son énergie massique est très importante ce qui fait de la batterie Li-ion une des moins lourdes et des moins volumineuses.
- Son rendement est excellent et son autodécharge relativement faible. Le gaspillage est donc réduit.

Un système de sécurité supplémentaire y est intégré car cette batterie présente des risques d'explosion lorsqu'elle est surchargée, trop déchargée ou court-circuitée. Sa durée de vie est d'environ 3 ans. [20]

## 1.2. Comparaison des types de batteries en énergie massique

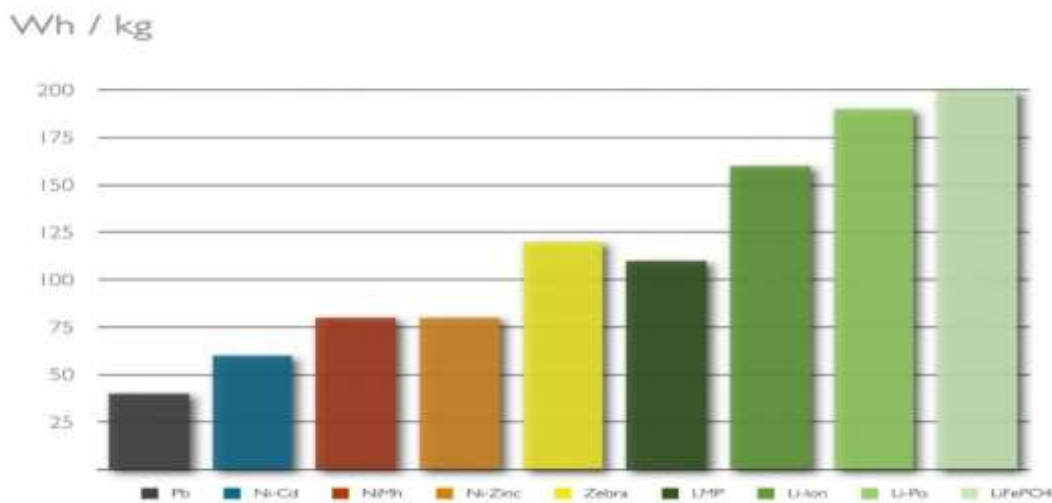


Figure (III.19) : Comparaison des différents types de batteries en énergie massique [24]

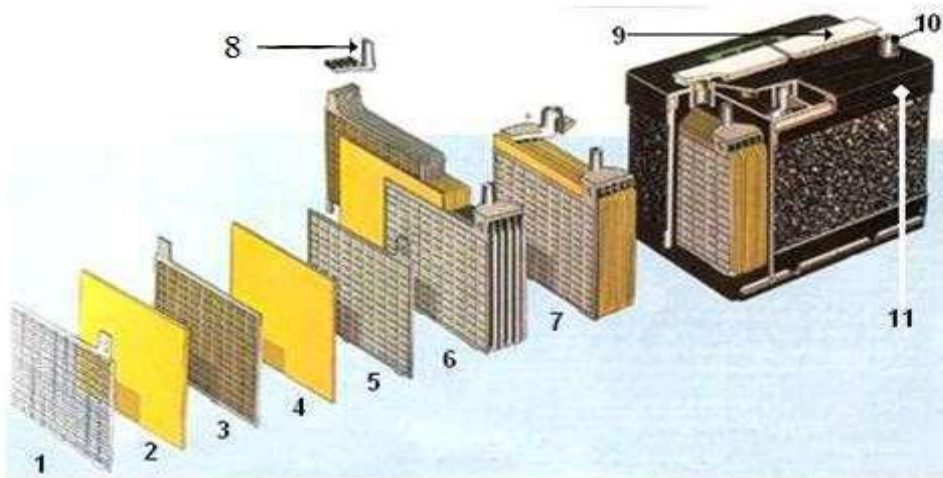
## 1.3. Composition d'une batterie solaire plomb- acide

Ces batteries sont composées de plusieurs plaques de plomb dans une solution d'acide sulfurique. La plaque consiste en une grille d'alliage de Plomb avec une pâte d'oxyde de plomb marquée sur la grille. La solution acide sulfurique et l'eau est appelée électrolyte.

Le matériel de la grille est un alliage de plomb parce que le plomb pur est un matériel physiquement faible, et pourrait se casser pendant le transport et le service de la batterie.

[17]

# Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque



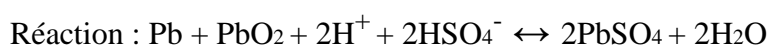
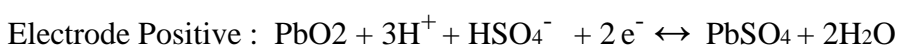
**Figure (III.20) :** Composition d'une batterie monobloc. [17]

- |                       |                        |
|-----------------------|------------------------|
| 1. : Grille.          | 7 : Élément couplet    |
| 2. : Séparateur.      | 8 : Pont               |
| 3. : Plaque positive. | 9 : Rampe de bouchons. |
| 4. : Plaque négative. | 10 : Borne             |
| 5 : Barrette          | 11 : bac               |
| 6 : Faisceau négatif. |                        |

## 1.4. Principe de fonctionnement

Une réaction chimique intervient lorsque la batterie alimente une charge connectée à ces deux électrodes. Pendant la décharge, il y a une oxydation à la plaque négative qui se traduit par une perte d'électrons et réduction à la plaque positive ou gain d'électrons. L'électrolyte en présence dans la batterie facilite le déplacement des charges électrochimiques sous forme d'ions.

Le processus inverse se produit quand la batterie se recharge on voit apparaître immédiatement une force électromotrice entre les deux électrodes. Les équations des réactions suivantes décrivent la réaction principale : [16]



# Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

---

## 1.5. Calcul de la capacité des Batteries

La quantité d'énergie que peut stocker une batterie est définie par sa capacité C, mesurée en ampère-heure (Ah). [21]

$$C = \frac{E_c \cdot N}{D \cdot U} \quad \text{(III.4)}$$

C : capacité de la batterie en ampère. Heure (Ah)

$E_c$  : énergie consommée par jour (Wh/j)

N : nombre de jour d'autonomie

D : décharge maximale admissible (0,8 pour les batteries au plomb)

U : tension de la batterie (V)

## 1.6. La durée de vie d'une batterie solaire

La durée de vie d'une batterie solaire s'évalue selon le nombre de cycles de charge/décharge qu'elle est capable de supporter. Car il s'agit d'une donnée basée sur un niveau de décharge et sur des conditions atmosphériques données.

La durée de vie d'une batterie solaire dépend d'abord de la technologie utilisée : plomb ouvert, AGM, GEL. Ensuite les batteries solaires vieillissent en raison des charges et décharges, le nombre de cycles dépend principalement de la profondeur habituelle de décharge. Pour donner un ordre d'idée, pour des décharges de l'ordre de 40%, on peut estimer les durées de vie suivantes pour les différents types de batteries à décharge lente : [21]

- Batterie solaire au plomb ouverte : 400 à 500 cycles
- Batterie solaire AGM(Absorbed Glass Mat) : 600 à 700 cycles
- Batterie solaire GEL : 800 à 900 cycles
- batterie solaire GEL Long Life : 600 à 2400 cycles

## 1.7.les critères de choix d'une batterie solaire

### a) critères techniques

- Les batteries solaires subissent un grand nombre de cycles charge / décharge et leur état de charge évolue au fil de la journée et encore plus au cours des saisons : c'est souvent à la fin de l'hiver que les batteries sont le plus déchargées.
- Les batteries solaires doivent supporter un grand nombre de cycles et doivent supporter la décharge profonde .
- On installe généralement des batteries pouvant supporter plus de 300 cycles à 80 % de décharge.
- Une batterie solaire doit résister à une profondeur de décharge pouvant dépasser les 80 %

# Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

---

et atteindre 100 % de décharge (mauvais ensoleillement, forte consommation électrique occasionnelle, tension de coupure des convertisseurs trop faible (10,5 V )...).

L'obtention du courant électrique à partir de panneaux solaires reste chère et la batterie solaire optimale devrait stocker l'énergie électrique avec le moins de perte possible (bon rendement de charge).

Une batterie déchargée doit accepter toute l'énergie en provenance des panneaux solaires afin de ne pas gaspiller l'énergie chèrement produite. L'acceptation de la charge d'une batterie solaire doit être bonne pour que les batteries se rechargent rapidement. Une fois stockée sous forme chimique, cette énergie électrique ne doit pas être perdue : l'autodécharge de la batterie doit être la plus faible possible.

Une bonne acceptation de la charge et une faible auto décharge favorisent un état de charge élevé, ce qui a une influence directe sur la durée de vie des batteries.

La durée de vie d'une batterie dépend de beaucoup des paramètres de charge (tensions...) qui eux-mêmes varient avec la température des batteries : une batterie "idéale" sera peu sensible à de mauvais paramètres de charge (régulateur solaire pas adapté, mal réglé, pas de compensation en température...). [22]

## **b)critères économiques**

Le coût d'achat des batteries est évidemment un critère important...

Au prix initial s'ajoute les coûts liés au transport, les frais liés à l'entretien des batteries que l'on cherchera à minimiser. [22]

## **c)critères liés à la sécurité**

L'absence de projections d'acide et de dégagement d'hydrogène est un critère important. [22]

## **1.8 : Association de batteries**

On associe des batteries en série pour obtenir des tensions multiples de (12 V ,24 V et 48V) et en parallèle pour augmenter la capacité. [16]

# Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

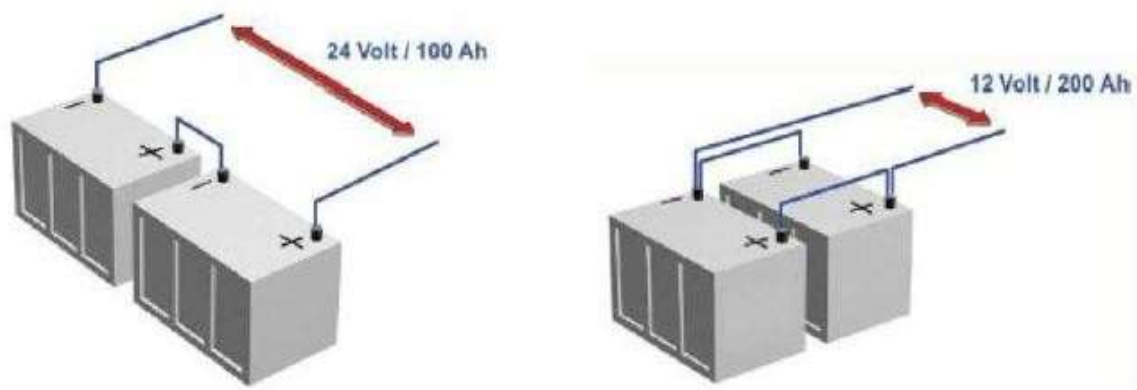


Figure (III.21) : Association de deux batteries en série / en parallèle. [16]

## 2. Régulateur de charge

Il se place entre les modules photovoltaïques et les batteries, le régulateur de charge permet de contrôler la charge pour éviter tout endommagement du stockage d'énergie (gérer la charge et la décharge de la batterie). Il permet de stabiliser la tension des modules photovoltaïques et de maintenir la charge des batteries de manière appropriée. [24]

### 2.1. Technologies des régulateurs

Il existe trois grandes familles de régulateurs de charge utilisant chacune une méthode différente de contrôle de charge :

- **Le type shunt** : le courant de charge des batteries est dévié vers une résistance et un courant-circuit est effectué au niveau des panneaux solaires photovoltaïques ; il convient aux applications de faible puissance.
- **Le type « série »** : le courant de charge des batteries est occasionnellement coupé par l'ouverture d'un circuit entre les panneaux solaires photovoltaïques et les batteries ; il convient aux applications de moyenne puissance.

Ces deux méthodes ont en commun qu'elles utilisent le niveau de tension des batteries pour déterminer le moment où réduire ou stopper complètement la charge des batteries.

- **Le type MPPT (Maximum Power Point Tracker)** : permet d'optimiser en permanence les paramètres électriques de fonctionnement entre les trois systèmes suivants :

Les modules photovoltaïques, les batteries et les récepteurs (moteur, Pompe, éclairage, réfrigérateur, etc.)

Il y parvient en mesurant en permanence la tension et le courant du panneau pour tirer de l'énergie au point de puissance maximale. Sa fonction de balayage lui permet de parcourir la tension du panneau solaire toutes les deux heures en vue de trouver le point de sortie

## Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

puissance maximale. Ainsi peut-il adapter la tension délivrée par le panneau à celle que les batteries solaires peuvent absorber. Ce type de régulateur est plutôt réservé aux systèmes de grande puissance en raison de son coût élevé. [17]

### 3) Onduleur

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif).

L'onduleur est généralement associé à un redresseur qui réalise la transformation du courant alternatif en courant continu et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter le circuit en continu de l'installation en cas de longue période sans soleil. [18]

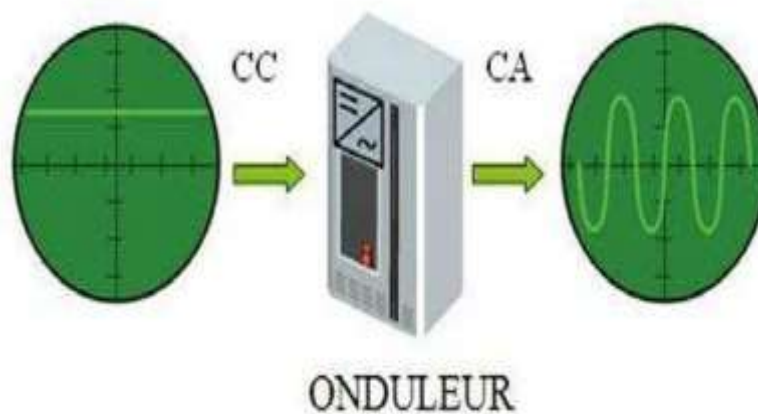


Figure (III.22) : rôle de l'onduleur. [18]

Il existe deux types d'onduleurs :

#### a) Le convertisseur continu - continu

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximale.

Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking).

Son rendement se situe entre 90 et 95%. [24]

Ce système présente deux inconvénients pour un champ PV de faible puissance :

- Prix élevé.
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important.

# Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

---

## b) Le convertisseur continu - alternatif

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La formation de l'ordre de sortie peut être assurée par deux dispositifs :

- **Rotatif** : C'est un moteur à courant continu couplé à un alternateur, son rendement varie de 50% à 60% pour 1KW jusqu'à atteindre 90% pour 50KW.

Ses avantages sont : simplicité, onde sinusoïdale, bonne fiabilité.

Ses inconvénients sont : cherté, faible rendement (surtout pour les faibles puissances). [24]

- **Statique** : On le désigne sous le nom d'onduleur. C'est un dispositif utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes à vide considérables surtout pour des faibles puissances. [24]

Les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (pulse width modulation) qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale. Avec ce système on obtient :

- Un rendement élevé sur une plage du taux de charge.

- De faibles pertes à vide. [24]

Le choix de ce type de composant relève, d'une part de sa particularité à pouvoir commuter de très grandes valeurs de courant et tension à des fréquences de découpage de plusieurs dizaines de KHz et d'autre part, parce qu'il permet la suppression de tous les circuits d'aide à la commutation des montages à thyristors.

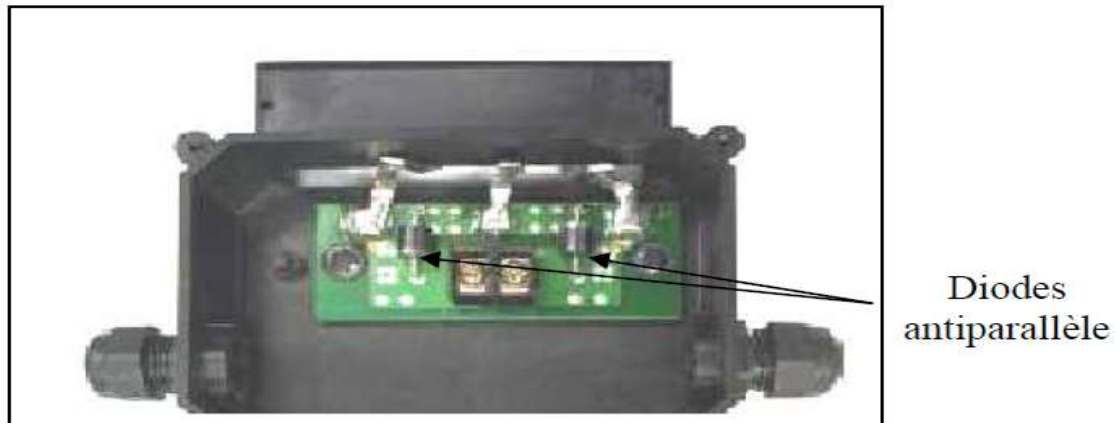
## 4) Boîte de jonction

En électricité, une **boîte de jonction** (BJ) est un boîtier électrique situé en aval d'un tableau électrique. Elle est située au plus près des installations sur le terrain et permet de centraliser les départs vers les différents appareils électriques.

Cette boîte de jonction doit être mise à la terre (si elle est en métal) pour éviter les risques d'électrisation en cas de défaillance. On doit aussi mettre un couvercle pour éviter de toucher les conducteurs accidentellement. Les connexions sont réalisées avec des capuchons de connexion ou avec des borniers. Les fils qui entrent dans la boîte peuvent être dans des câbles ou dans des conduites. On les fixe à la boîte avec des connecteurs. [23]

## Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

---



**Figure (III.23) :** boîte de jonction. [23]

### 9. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents composants d'une installation solaire photovoltaïque avec leurs rôles et principes de fonctionnements. Le bon fonctionnement de cette installation requiert un bon dimensionnement de ces composants, c'est ce que nous allons voir dans le chapitre suivant.

## **Chapitre III : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque**

---

**CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT  
D'UNE INSTALLATION  
PHOTOVOLTAÏQUE**

# Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

---

## 1. Introduction

La méthode de dimensionnement consiste à déterminer d'abord la puissance crête d'un panneau photovoltaïque qui fournit l'énergie électrique nécessaire pendant la journée. Elle consiste à déterminer la période de besoin en électricité, et la consommation requise. Cette étape comporte peu de calculs, mais demande relativement beaucoup de réflexion car une erreur à ce stade peut rendre l'installation photovoltaïque obsolète.

La méthode comporte 08 étapes qui se résument comme suit :

## 2. procédure de calcul

### 2.1. Etape I. Consommation énergétique

Un système bien adapté nécessite l'évaluation de la puissance électrique des applications à alimenter. L'énergie nécessaire s'exprime par :

$$E_c = P \times t \quad (IV.1)$$

Avec :

$E_c$  : énergie consommée

$P$  : puissance de fonctionnement de l'appareil

$t$  : temps d'utilisation

L'énergie est donc le produit de la puissance par le temps. La relation (IV.1) permet de calculer les besoins journaliers en énergie.

En effet, comme un système photovoltaïque doit fournir son énergie durant une journée entière, il est naturel de prendre la période de 24 heures comme unité de temps.

L'énergie  $E$ , est donc l'énergie électrique consommée en 24 heures par l'application et s'exprime en Watt- heure par jour (Wh/j). On l'appelle aussi consommation journalière.

## Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

---

Pour calculer la consommation totale d'une installation, on calcule d'abord l'énergie électrique consommée en 24 heures par chaque équipement ou chaque fonction électrique et ensuite on les additionne.

Elle s'exprime par :

$$E_t = \sum P_i \times T_i \quad (\text{IV.2})$$

Avec :

$P_i$  : Puissance électrique d'un appareil «  $i$  » exprimée en Watt (W).

$T_i$  : Durée d'utilisation de cet appareil «  $i$  » en heure par jour (h/j).

Lorsque tous les appareils fonctionnent à la même tension, la consommation journalière peut également se chiffrer en Ampère - heure par jour (Ah/j), unité pratique pour tous les systèmes liés à une batterie.

Comme ces équipements fonctionnent en alternatif et que la consommation énergétique passe par un onduleur, il est nécessaire de tenir compte du rendement de l'onduleur pour évaluer la puissance requise, on écrit alors :

Puissance corrigée = puissance des appareils à alimenter  $\times$  Rendement de l'onduleur

### 2.2. Etape II. Energie solaire récupérable

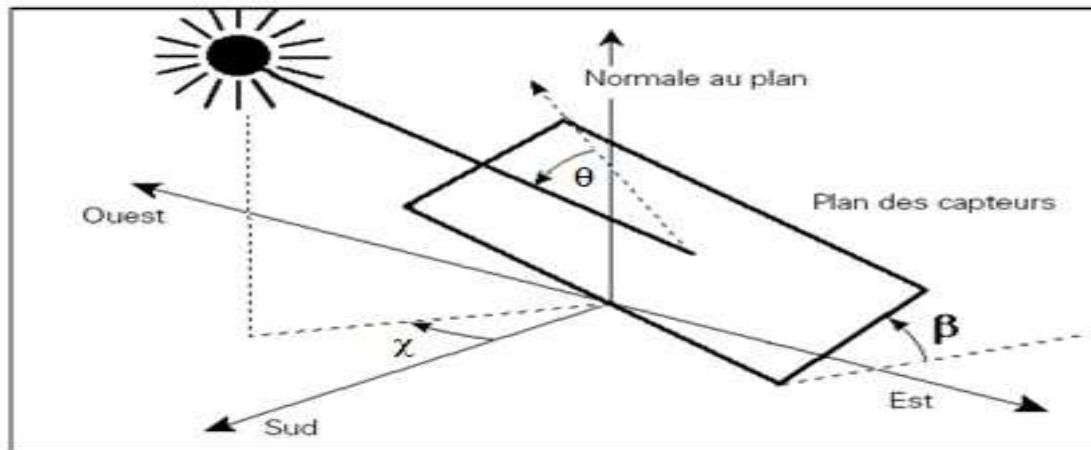
#### ➤ Inclinaison et orientation optimales des capteurs photovoltaïques

L'énergie fournie par les capteurs photovoltaïques est directement proportionnelle à l'ensoleillement. Afin d'optimiser au mieux l'installation solaire il faut donc tenir compte de ce facteur, qui dépend à son tour du lieu de l'installation, de l'orientation et de l'inclinaison de ces capteurs.

Idéalement, ils doivent être orientés en plein Sud dans l'hémisphère Nord et en plein Nord dans l'hémisphère Sud, à l'écart des zones ombragées, et inclinés d'un angle qui permet l'optimisation de l'énergie récupérée.

## Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

Un plan incliné est caractérisé par son inclinaison  $\beta$  (par rapport à l'horizontale), et son orientation ou azimut  $\chi$  par rapport au sud. [25]



**Figure (IV.1) :** Définition des angles pour un plan incliné : inclinaison  $\beta$ , azimut  $\chi$  et l'angle d'incidence  $\theta$ . [25]

Plus les rayons sont proches de la perpendiculaire au plan des panneaux ( $\cos \theta \approx 1$ ), plus la quantité d'énergie disponible est importante.

- En moyenne, sur l'année, l'inclinaison optimale pour maximiser l'énergie annuelle produite est égale à la latitude du lieu.
- Une inclinaison plus forte que la latitude peut augmenter l'énergie récupérée en hiver (la trajectoire du soleil étant basse dans le ciel), au détriment de celle récupérée en été. L'inverse est réalisé pour une inclinaison plus faible que la latitude.

Ces considérations sont prises en compte lors du dimensionnement d'un système photovoltaïque.

Le tableau suivant donne les valeurs de l'inclinaison recommandée des capteurs photovoltaïques pour une utilisation annuelle constante en fonction de la latitude. [26]

# Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

Latitude $\varphi$ (°)	Inclination $\beta$ (°)
$\varphi < 10^\circ$	$10^\circ$
$10^\circ < \varphi < 30^\circ$	$\Phi$
$30^\circ < \varphi < 40^\circ$	$\varphi + 10^\circ$
$\varphi > 40^\circ$	$\varphi + 15^\circ$

**Tableau (IV.1) :** Relation entre la latitude et l'inclinaison des panneaux pour une utilisation annuelle.

## ➤ **Ombre ou repérage des masques**

Il arrive que les modules soient placés face à un type d'obstacle comme les bâtiments, montagnes, arbres...etc. qui masqueront le soleil.

Ces effets d'ombrage sur le rayonnement reçu sont très difficiles à estimer intuitivement, cependant, il faut faire attention aux ombrages partiels et même ponctuels puisqu'ils influent sur la production d'énergie et provoque un déficit de production important dont il faut tenir compte.

Il faut noter que lorsqu'une cellule est ombrée, c'est le courant de toute la chaîne des cellules en série qui est limité et cela peut avoir de graves conséquences si les panneaux ne sont pas équipés de diodes anti-retour.

## **2.3. Etape III. Données météorologiques**

La conception des systèmes photovoltaïques nécessite la connaissance du rayonnement solaire utile sur le site d'installation. Cette connaissance est l'un des paramètres essentiels de l'étude préalable.

Pour un besoin électrique donné, plus l'énergie solaire reçue est grande, moins est le nombre de panneaux solaires à installer et inversement.

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé au sol. L'influence de l'atmosphère provoque la diffusion et l'absorption d'une partie du rayonnement incident.

La modification par l'atmosphère du rayonnement solaire obéit à des phénomènes assez complexes et surtout en grande partie aléatoires.

# Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

---

Le flux lumineux reçu au niveau du sol à un instant donné dépend d'un grand nombre de paramètres :

Gaz présents dans l'atmosphère, Nuages, Albédo (réflectivité du sol), Température ambiante, Vent, Humidité relative, etc...

Or tous ces paramètres dépendent du lieu géographique, de la saison, de l'heure de la journée, des conditions météorologiques du moment.

Il est donc important de disposer de données fiables en recourant à des statistiques accumulées sur les années antérieures grâce à un instrument de mesure appelé « héliographe ».

Grace à cet instrument de mesure, les stations météorologiques élaborent des statistiques de rayonnement solaire intégré en [KWh/m<sup>2</sup>. J] à partir de toutes les données récoltées. Ce sont ces données, globales sur une journée, qui servent la plupart du temps au dimensionnement d'un système photovoltaïque.

## 2.4. Etape IV. Dimensionnement du générateur photovoltaïque

Cette étape consiste à calculer la quantité de modules photovoltaïques que l'on devra posséder pour couvrir les besoins en électricité.

### 2.4.1. Puissance crête d'un générateur photovoltaïque

La puissance crête des panneaux à installer dépend de l'irradiation du lieu d'installation. On la calcule en appliquant la formule suivante : [27]

$$P_{ch} = \frac{E_c}{K.I_r} \quad (IV.3)$$

$P_{ch}$  : Puissance crête de champs photovoltaïque en Watt crête (Wc)

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

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

En Algérie :  $2 \geq I_r \leq 8$ . On prend la moyenne de 5 h/Jour

# Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

**K**: Coefficient correcteur, ce coefficient tient compte :

- De l'incertitude météorologique.
- De l'inclinaison non corrigée des modules suivant la saison.
- Du point de fonctionnement des modules.
- Du rendement moyen charge/décharge de la batterie (90%).
- Du rendement de régulateur (95%).
- Des pertes dans les câbles et connexions pour les systèmes avec batterie.

**K** est en générale compris entre 0,55 et 0,75. La valeur souvent utilisée dans les calculs du système avec batterie est  $k=0,65$ . [28]

## 2.4.2. Tension de fonctionnement du champ photovoltaïque

On choisit la tension de fonctionnement en fonction de la puissance crête du champ photovoltaïque en watt. De façon générale : [27]

Puissance crête( $W_c$ )	Moins de $500W_c$	De $501W_c$ à $2000W_c$	De $2001W_c$ à $10000W_c$	Plus de $1000W_c$
Tension de champ (V)	12	24	48	96

**Tableau (IV.2)** : Tension du champ en fonction de sa puissance crête [27]

## 2.5. Etape V. Nombre de panneaux photovoltaïques à utiliser

A partir de la puissance crête des panneaux on peut déterminer le nombre de :

- ❖ Panneaux solaire nécessaires à l'installation :

$$N_m = \frac{P_{ch}}{\text{Puissance crête unitaire panneau}} \quad (\text{IV.4})$$

- ❖ Le nombre de modules connectés en série sera égale à :

$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_n} \quad (\text{IV.5})$$

$V_{ch}$ : tension total du champ.

$V_n$ : la tension délivrée par un seul panneau photovoltaïque.

## Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

---

❖ Le nombre de modules connectés en parallèles s'exprime par :

$$N_p = \frac{Nm}{Vn} \quad (\text{IV.6})$$

Avec :

$N_m$  : nombre total de panneaux photovoltaïques

$N_s$  : nombre de panneaux connectés en série

### 2.6. Etape VI. Dimensionnement du parc de batteries

Pour réaliser le dimensionnement des batteries, on procède de la façon suivante :

- On calcule l'énergie consommée ( $E_c$ ) par les différents récepteurs.
- On détermine le nombre de jours d'autonomie nécessaires.
- On détermine la profondeur de décharge acceptable pour le type de batterie utilisé.
- On calcule la capacité (C) de la batterie en appliquant la formule ci-dessous :

$$C_{ch} = \frac{E_c \times N}{D \times U} \quad (\text{IV.7})$$

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

$E_c$  : énergie consommée par jour (Wh/j)

N : nombre de jour d'autonomie

D : décharge maximale admissible (0,8 pour les batteries au plomb)

U : tension de la batterie (V)

❖ Nombre de batteries en séries :

$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_{batterie}} \quad (\text{IV.8})$$

$V_{ch}$  : tension du champ

$V_{batterie}$  : la tension de la batterie

# Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

---

❖ Nombre de batterie en parallèles :

$$N_p = \frac{C_{ch}}{C_{batterie}} \quad (IV.9)$$

Avec :

$C_{ch}$  : capacité totale du champ de batteries associées à toute l'installation photovoltaïque.

$C_{batterie}$  : capacité d'une batterie.

La durée de vie en d'une batterie décroît rapidement lorsque la profondeur de décharge augmente. En général, on essaie de limiter la profondeur de décharge à 50%, c'est-à-dire que l'on utilisera que la moitié de la capacité de batteries.



Figure (IV.2) : Aperçu d'une batterie solaire

## 2.7. Etape VII. Dimensionnement du régulateur de charge

Le régulateur est dimensionné d'après les paramètres suivants : tension, courant d'entrée et courant de sortie.

**Tension nominale** : Elle doit être celle du champ photovoltaïque.

**Courant d'entrée  $I_e$**  : C'est le courant de charge maximal que les modules sont susceptibles de débiter. Il doit être supporté sans problème par le régulateur. Pour estimer ce courant, le plus sûr est de prendre 1,5 fois le courant maximal. [29]

**Courant de sortie  $I_s$**  : L'intensité du courant de sortie du régulateur doit être supérieure à la valeur maximale que peuvent tirer les récepteurs simultanément. Elle peut être déterminée par la formule suivante : [27]

## Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

$$I_{\max} = P_{ch} / u \quad (IV.10)$$

$P_{ch}$  : la puissance crête du champ de photovoltaïque qui es calculé comme suit :

$$P_{ch} = P_c \times N_p \times N_s \quad (IV.11)$$



Figure (IV.3) : régulateur de charge

### 2.8. Etape VIII. Dimensionnement de l'onduleur

Le convertisseur de courant se dimensionne en fonction de plusieurs critères :

- La tension d'entrée : c'est la même que la tension des batteries ou du régulateur (12, 24 ou 48V DC).
- La tension de sortie : en Algérie nous utilisons du 220/230 V, 50Hz.
- La puissance nominale : c'est la puissance que les appareils consomment en électricité pour fonctionner de façon "normale". Pour connaître cette puissance nominale, il suffit de faire la somme des puissances des appareils électriques susceptible d'être utilisés en même temps Il faut toujours choisir un convertisseur dont la puissance est légèrement supérieure à celle des appareils.
- La puissance maximale : l'onduleur doit être capable de fournir une grande puissance (généralement 2 ou 3 fois la puissance nominale). Cette particularité est utile pour les appareils qui possèdent un moteur (réfrigérateur, micro-onde, lave-linge, ...), car leur

## Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

---

consommation augmente très fortement lors du démarrage. En général, si vous avez correctement dimensionné la puissance nominale, la puissance maximale est prévue par ces onduleurs est suffisante.

- Le rendement : Une partie de l'électricité transformée est consommée par le convertisseur de courant (entre 80 et 95% de l'énergie est restituée). Il est important de contrôler ce rendement, sachant qu'un bon produit se situe autour de 90%.

De plus, la plupart des convertisseurs consomment de l'énergie même lorsqu'ils ne fonctionnent pas (stand-by). Certains sont équipés d'un système de marche/arrêt qui permet de grandes économies dans les petites installations photovoltaïques.

### 2.9. Etape IX. Le dimensionnement des câbles électriques solaires

Pour assurer le transport de l'énergie des modules jusqu'au régulateur de charge, on ne peut pas utiliser n'importe quel câble électrique.

Les câbles solaires sont étudiés pour résister aux conditions liées à leur utilisation. Ils sont les seuls à pouvoir assurer une longue durée de vie (supérieure à 30 ans) tout en minimisant les pertes d'énergie.

La résistance d'un câble électrique ne dépend ni de la tension ni de l'intensité du courant qui le traverse, mais dépend de la résistivité ( $\rho$ ) du matériaux utilisé (cuivre, argent, fer, ...), de la longueur du câble, de sa section, et de sa température.

Le cuivre est de loin le conducteur le plus utilisé, et sa résistivité oscille entre  $16 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$  à  $0^\circ C$  et  $17 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$  à  $25^\circ C$ . L'équation permettant de connaître la résistance est la suivante :

$$\mathbf{R = \rho \times L / S} \qquad \mathbf{(IV.12)}$$

Avec :

R : la résistance en ( $\Omega$ )

$\rho$  : la résistivité en ( $\Omega \cdot m$ )

L : la longueur du câble en (m)

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

## Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

---



Figure (IV.4) : le câble solaire

### 3.Application

Pour mieux comprendre les étapes utiles au dimensionnement d'une installation photovoltaïque on se propose de faire une application sur une habitation. La figure (IV.5) illustre les différents éléments de l'installation photovoltaïque.

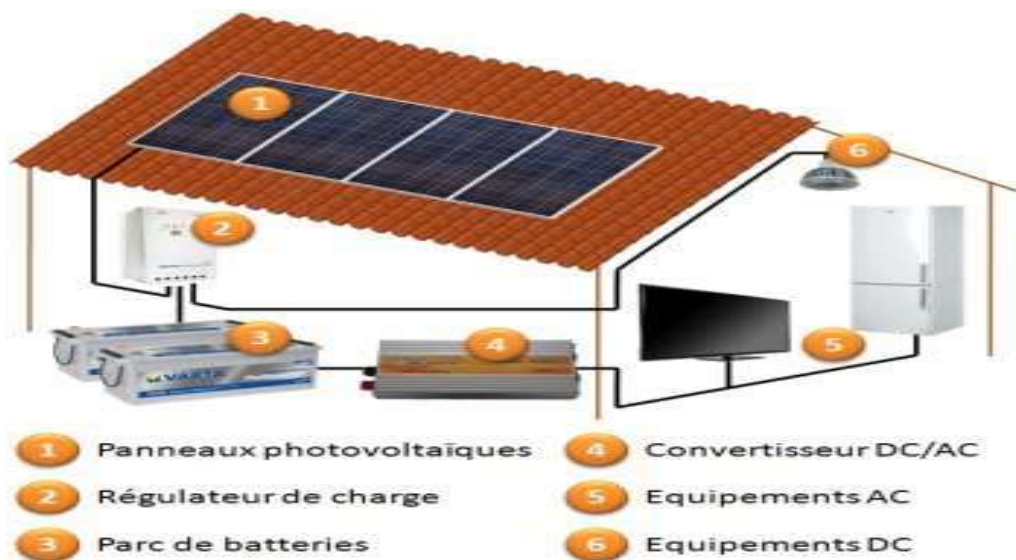


Figure (IV.5) : image d'une maison équipée d'une installation photovoltaïque

## Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

---

Les panneaux photovoltaïques (1), disposés sur la toiture de la maison, captent les rayons solaires qu'ils transforment en électricité par effet photovoltaïque. Pour assurer un fonctionnement optimal de ces panneaux, on dispose un régulateur de charge (2) qui assure la charge du parc de batteries (3) et l'alimentation des appareils fonctionnant en courant continu (6). Pour les équipements fonctionnant en courant alternatif (5), on utilise à cet effet, un onduleur (4) qui convertit le courant continu en courant alternatif.

### 3.1. Consommation énergétique (étape I)

Appareils	Nombre de Charges	Puissance nominal (W)	Heure d'utilisation (H)	Energie (Wh/jour)	Rendement de conversion	Energie corrigée du rendement (Wh/jour )
Lampe salle 1	2	25	4	200	-	200
Lampe salle 2	2	25	4	200	-	200
Lampe couloir	4	25	4	400	-	400
Lampe WC	2	25	2	100	-	100
Ordinateur	1	400	4	1600	0.95	1520
Imprimante	1	45	1	45	0.95	42.75
Photocopieuse	1	35	1	35	0.95	33.25
Télévision	1	100	3	300	0.95	285
Réfrigérateur	1	250	24	6000	0.95	5700
<b>Total</b>	.....	1130	.....	.....	.....	8481

**Tableau (IV.3) :** Consommation énergétique de l'habitation

# Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

---

## 3.2. Localisation du site (étape II)

**Wilaya :** Tizi Ouzou

**Site :** bastos

**Latitude :** 36°, 42 Nord

**Longitude :** 4°,08 Est

**Altitude :** 153,40 mètres

**Albédo :** 0,2

**Température ambiante min :** +5°C

**Température ambiante max :** +40°C

D'après le tableau (IV.1) on prend l'Inclinaison comme suit :  $\beta (^{\circ}) = \phi + 10^{\circ}$

Ce qui donne :

$$\beta (^{\circ}) = 36^{\circ} 42 + 10^{\circ} = 46^{\circ}, 42$$

## 3.3. Données météorologiques (étape 3)

En Algérie :

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

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

En général on prend la moyenne de : 5 h/jour

## 3.4. Dimensionnement du générateur photovoltaïque (étapes 4)

Les lampes disponibles sur le marché fonctionnent soit en alternatif, soit en continu mais avec des tensions inférieures à 24V.

Afin d'éviter d'ajouter des convertisseurs qui augmentaient la consommation, et donc les coûts de l'installation, Il est judicieux de répartir les consommateurs en deux catégories, ceux fonctionnant en continu et ceux fonctionnant en alternatif.

## Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

---

Ensuite, on procède au dimensionnement de chacun d'eux. Leurs besoins sont consignés dans les tableaux suivants :

➤ **Cahier de charge pour les appareils qui fonction en courant continu :**

Appareils	Nombre de charge	Puissance (W)	Heure d'utilisation(h)	Energie (Wh/jour)
Lampes salle 1	2	25	4	200
Lampes salle 2	2	25	4	200
Couloire	4	25	4	400
WC	2	25	2	100
<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>250</b>	<b>16</b>	<b>900</b>

**Tableau (IV.4) :** Différentes charges fonctionnant en courant continu

➤ **Cahier de charge pour les appareils qui fonction en courant alternatif :**

Appareils	Nombre de charge	Puissance (W)	Heure d'utilisation (h)	Energie Consommée (Wh/jour)	Rendement De conversion	Energie corrigée du rendement
Ordinateur	1	400	4	1 600	0.95	1 520
Imprimante	1	45	1	45	0.95	42.75
Photocopieuse	1	35	1	35	0.95	33.25
Télévision	1	100	3	300	0.95	285
Réfrigérateur	1	250	24	6000	0.95	5700
<b>Total</b>	.....	<b>879</b>	.....	.....	.....	<b>7581</b>

**Tableau (IV.5) :** Différentes charges fonctionnant en courant alternatif

## Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

En appliquant l'équation (IV.3) on va calculer la puissance crête pour les deux installations.

- **Puissance crête de l'installation fonctionnant en courant continu**

Tenant compte de la puissance nécessaire au fonctionnement des appareils en courant continu (Tableau-IV-4), on évalue la puissance crête des panneaux solaires, donnée par l'équation (IV-3), comme suit :

$$P_c = \frac{900}{0,65 \times 5} = 276,923 \text{ W}_c$$

- **La puissance crête de l'installation en courant alternatif**

Tenant compte de la puissance nécessaire au fonctionnement des appareils en courant alternatif (Tableau-IV-5), on évalue la puissance crête des panneaux solaires, donnée par l'équation (IV-3), comme suit :

$$P_c = \frac{7\,581}{0,65 \times 5} = 2332,615 \text{ W}_c$$

D'après ces puissances crêtes, en se référant au tableau (IV.2) on détermine la tension de chaque installation, il vient que :

	Courant continu	Courant alternatif
La puissance crête( $W_c$ )	276.923	2332.615
Tension de l'installation U (V)	12	48

**Tableau (IV.6) :** Tensions des différentes installations

- **Caractéristiques du panneau solaire à utiliser pour les deux installations**

Les panneaux photovoltaïques choisis sont de type monocristallin, leurs caractéristiques sont consignées dans la figure ci-dessous :

## Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

Caractéristiques techniques			
Puissance nominale	100W	Type de cellule	Silicium monocristallin
Tension max	1000V DC	Nombre de cellule	36 pcs
± Tolérance	+3%	Longueur	1000mm
Rendement du panneau	13%	Largeur	670mm
Voltage Mpp	18V	Epaisseur	35mm
Intensité Mpp	5,56A	Cadre	Aluminium
Intensité de court-circuit	5,08A	Poids	9kg
Voltage circuit ouvert	21,5V	Diodes anti-retour	3
Boîtier de jonction	Etanche IP67	Température d'utilisation	-40°C -- +85°C
Test STD	AM 1.5,250C,1000W/M2		

**Figure (IV.6):** Caractéristiques techniques du panneau photovoltaïque à utiliser dans les deux installations

### • Nombre de panneaux à utiliser pour l'installation en courant continu

D'après les équations (IV.4.5.6) le nombre de panneaux utiliser en séries et en parallèles correspond à :

➤ Nombre de panneaux total à utiliser :

$$N_m = \frac{P_c}{\text{Puissance crete unitaire panneau}}$$

Ce qui donne :

$$N_m = \frac{276,923}{100} = 2,763$$

Donc on utilise 3 panneaux de 100 W<sub>c</sub>.

➤ Le nombre de modules connectés en série :

$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_n}$$

Ce qui donne:

$$N_s = \frac{12}{18} = 0,66$$

Donc on utilise un seul panneau de 100W<sub>c</sub> connecté en série.

## Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

---

➤ Le nombre de modules connectés en parallèles :

$$N_p = \frac{N_m}{N_s}$$

Ce qui donne :

$$N_p = \frac{3}{1} = 3$$

Donc on utilise 3 panneaux de 100 W<sub>c</sub> connectés en parallèles.

• **Nombre de panneaux total à utiliser pour l'installation en courant alternatif**

$$N_m = \frac{P_c}{\text{Puissance crete unitaire panneau}}$$

Ce qui donne :

$$N_m = \frac{2332,615}{100} = 23,32$$

Donc on utilise 24 panneaux de 100 W<sub>c</sub>.

➤ Le nombre de modules connectés en série :

$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_n}$$

Ce qui donne :

$$N_s = \frac{48}{18} = 2,66$$

Donc on utilise 3 panneaux de 100W<sub>c</sub> connectés en séries.

➤ Le nombre de modules connectés en parallèles :

$$N_p = \frac{N_m}{N_s}$$

Ce qui donne :

$$N_p = \frac{24}{3} = 8$$

Donc on utilise 8 panneaux de 100 W<sub>c</sub> connectés en parallèles.

# Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

## 3.5. Choix des batteries (étape 5)

- **Capacité totale pour l'installation en courant continu**

A partir des équations (IV-7.8.9) on va calculer le nombre total des batteries à utiliser en série et en parallèle. Pour 4 jours d'autonomie ( $N=4$ ), tenant compte de la puissance requise au fonctionnement des appareils en courant continu (Tableau IV.4), la relation (IV.7) permet d'évaluer la capacité de charge.

Ce qui donne :

$$C_{ch} = \frac{900 \times 4}{0,8 \times 12} = 375 \text{ Ah}$$

Afin de stocker cette énergie, on utilise des batteries solaires pour les deux installations ayant pour tension : 12 V et une capacité :  $C_{batterie} = 130 \text{ Ah}$ .



**Figure (IV.7) :** La batterie solaire à utiliser pour les deux installations

Cet ensemble de batteries étant disposé en parallèle et en série, le nombre de batteries montées en série est évalué comme suit :

$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_{batterie}}$$

Ce qui donne :

$$N_s = \frac{12}{12} = 1$$

## Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

---

Alors que le nombre de batteries installées en parallèle correspond à :

$$N_p = \frac{C_{ch}}{C_{batterie}}$$

Ce qui donne :

$$N_p = \frac{375}{130} = 2,88$$

Donc en utilise 3 batteries de 12 V et 130 Ah.

Le nombre total de batteries à utiliser pour l'installation en courant continu correspond alors à :

$$\text{Nombre total de batteries} = N_p \times N_s$$

Ce qui donne :

$$N_t = 3 \times 1 = 3$$

### • Capacité totale pour l'installation en courant alternatif

A partir des équations (IV-7.8.9) on va calculer le nombre total des batteries à utiliser en série et en parallèle. Pour 4 jours d'autonomie ( $N=4$ ), tenant compte de la puissance requise au fonctionnement des appareils en courant alternatif (Tableau IV.5), la relation (IV.7) permet d'évaluer la capacité de charge.

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

**AN :**

$$C_{ch} = \frac{7581 \times 4}{0,8 \times 48} = 789,687 \text{ Ah}$$

➤ Nombre de batteries en séries :

$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_{batterie}}$$

Ce qui donne :

$$N_s = \frac{48}{12} = 4$$

## Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

---

Donc on utilise 4 batteries de tension 12 V et de capacité 130 Ah

➤ Nombre de batteries en parallèles :

$$N_p = \frac{C_{ch}}{C_{batterie}}$$

Ce qui donne :

$$N_p = \frac{789,687}{130} = 6,07$$

Donc en utilise 6 batteries de 12 V et 130 Ah.

Le nombre total de batteries à utiliser pour l'installation en courant alternatif correspond alors à :

$$\text{Nombre total de batteries} = N_p \times N_s$$

Ce qui donne :

$$N_t = 6 \times 4 = 24$$

### 3.6. Choix du régulateur de charge (étape 6)

- En appliquant les équations (IV.10.11) ; La régulation de charge sera dimensionnée pour l'installation de 12 V Comme suit :

$$I_{max} = P_{c/champs} / U$$

Avec :

$$P_{c/champs} = P_c \times N_p \times N_s$$

Ce qui donne :

$$P_{c/champs} = 100 \times 3 \times 1 = 300 \text{ W}_c$$

Ce qui donne :

$$I_{max} = 300/12 = 25 \text{ A}$$

- La régulation de charge sera dimensionnée pour l'installation de 48 V comme suit :

$$I_{max} = P_{c/champs} / U$$

## Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

---

$$P_{c/champs} = P_c \times N_p \times N_s$$

$$P_{c/champs} = 100 \times 8 \times 3 = 2400 W_c$$

Ce qui donne :

$$I_{max} = 2400/48 = 50 A$$

	Courant continu	Courant alternatif
Type de régulateur	12V / 25 A	48 V / 50 A

**Tableau (IV.7) :** Types de régulateurs de charge à utiliser dans les deux installations



**Figure (IV.8) :** Les deux types de régulateurs de charge à utiliser pour les deux installations

# Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

---

## 3.7. Choix de l'onduleur (étape 7)

Les caractéristiques de l'onduleur utilisé doivent être compatibles avec une installation ayant une tension de 48 V et une demande de puissance de 2400 Wc.

$$P_{\text{onduleur}} = (P^2 + P_r^2)^{1/2}$$

Avec :

$$P_r = P \times \frac{\sin\beta}{\cos\beta}$$

$P_r$  : puissance réactive [KVAR]

$P$  : puissance crête du champ photovoltaïque

On prend :  $\cos\beta = 0,8$  et  $\sin\beta = 0,6$

Ce qui donne :

$$P_r = 2400 \times \frac{0,6}{0,8} = 1800\text{VAR} = 1,8 \text{ KVAR}$$

$$P_{\text{onduleur}} = (2,4^2 + 1,8^2)^{1/2} = 3\text{KVA}$$



# Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

---

**Figure (IV.9) :** l'onduleur a utilisé pour l'installation en courant alternatif

## 3.8. Choix des câbles (étape8)

Dans cette partie, on donne un aperçu de calcul des câbles nécessaires à la connexion des différents panneaux photovoltaïques, quant aux autres connexions (régulateur, appareils, onduleur) elles restent tributaires des conditions de réalisation sur le site.

La chute de tension admise à travers un câble étant de 2% de la tension appliquée sur le champ de batteries de stockage, il vient que la différence de potentiel admise au bornes d'un câble de connexion correspond à :

$$\Delta U = \text{Tension appliquée} \times 0,02$$

### ➤ Calcul de la section du câble à utiliser Pour l'installation en courant continu

Tenant compte de l'intensité optimale délivrée par un panneau solaire (Figure IV.5), soit :

$$I_{\max} = 5,56 \text{ A}$$

Il vient que pour trois panneaux connectés en parallèles, l'intensité totale délivrée sera :

$$I_{\max} = 5,56 \times 3 = 16,68 \text{ A}$$

La tension du champ de batteries étant de 12V, la chute de tension admise pour les câbles de connexion sera alors :

$$\Delta U = 12 \times 0,02 = 0,24 \text{ V}$$

A partir de la loi d'Ohm, on évalue la résistance de ces câbles par :

$$R = \Delta U / I = 0,24 / 16,68 = 0,014 \Omega$$

Considérant que la longueur du câble solaire à utiliser étant égale à la largeur des trois panneaux en parallèles, il vient que :

$$L = 0,67 \times 3 = 2,01 \text{ m}$$

Tenant compte de l'équation (IV.12), la section des câbles à utiliser se déduit par :

$$S = \rho \times L / R$$

## Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

---

Ce qui donne :

$$1,6 \times 10^{-8} \times \frac{2,01}{0,014} = 2,229 \text{ mm}^2$$

En se référant au Tableau (IV.8) la section normalisée correspond à : 2,5 mm<sup>2</sup>.

### ➤ Calcul de la section du câble à utiliser Pour l'installation en courant alternatif

Tenant compte de l'intensité optimale délivrée par un panneau solaire (Figure IV.5), soit :

$$I_{\max} = 5,56 \text{ A}$$

Il vient que pour huit panneaux connectés en parallèles, l'intensité totale délivrée sera :

$$I_{\max} = 5,56 \times 8 = 44,48 \text{ A}$$

$$\Delta U = 48 \times 0,02 = 0,96 \text{ V}$$

$$R = \Delta U / I = 0,96 / 44,48 = 0,022 \text{ } \Omega$$

Considérant que la longueur du câble solaire à utiliser étant égale à la largeur des huit panneaux en parallèles, il vient que :

$$L = 0,67 \times 8 = 5,36 \text{ m}$$

Tenant compte de l'équation (IV.12), la section des câbles à utiliser se déduit par :

$$S = \rho \times L / R$$

Ce qui donne :

$$1,6 \times 10^{-8} \times \frac{5,36}{0,022} = 4,04 \text{ mm}^2$$

En se référant au Tableau (IV.8) la section normalisée correspond à : 6 mm<sup>2</sup>.

Section en mm <sup>2</sup>	0,5	0,75	1	1,5	2,5	<b>4</b>	6	<b>10</b>	16
Intensité max en Ampères (A)	3	6	10	16	25	30	40	<b>60</b>	80

## Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

**Tableau (IV.8) :** Variation de la section du câble en fonction de l'intensité du courant

Les résultats du dimensionnement pour les deux systèmes sont résumés dans le tableau suivant :

Dimensionnement		ystème 1 (DC)	ystème 2 (AC)
Puissance crête à installer (WC)		900	7581
Tension de l'installation (V)		12	48
Nombre de modules	Total	3	24
	En série	1	3
	En parallèle	3	8
Batteries	Capacité Total (Ah)	375	789,687
	Nombre total	3	24
	Eléments en séries	1	4
	Eléments en parallèles	3	6
	Courant de sortie(A)	16,65	44,48
Régulateur de charge		12V /25A	48V/50A
Type de câble section (mm <sup>2</sup> )/ et longueur(m)		2.5mm <sup>2</sup> /2,01m	6mm <sup>2</sup> /5,36m
Puissance de l'onduleur (KVA )		Pas d'onduleur	3KVA

**Tableau (IV.9) :** Résultats du dimensionnement pour les deux systèmes

# Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque

---

## 4. Conclusion

Afin de réaliser une installation photovoltaïque, on se doit de suivre huit étapes :

Etape-1 : Evaluation des besoins énergétiques du local à alimenter en électricité.

Etape-2 : Localisation du site qui permettra de définir l'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires.

Etape-3 : Données météorologiques qui permettent de définir le temps moyen d'ensoleillement journalier

Etape-4 : Détermination du nombre de panneaux solaires photovoltaïques à installer en série et en parallèle.

Etape-5 : Choix des batteries de stockage d'électricité produite par les panneaux PV.

Etape-6 : Choix du régulateur de charge.

Etape-7 : Choix de l'onduleur qui convertit le courant continu en courant alternatif.

Etape-8 : Dimensionnement des câbles pour les besoins de branchements.

Pour les besoins d'application, on s'est proposé de faire un calcul d'une installation photovoltaïque pour une habitation. Ces différentes étapes ont permis de déterminer les éléments nécessaires à cette installation.

## **Chapitre IV: dimensionnement d'une installation photovoltaïque**

---

# CONCLUSION GÉNÉRALE

# Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne le dimensionnement d'une installation photovoltaïque d'une habitation située à Tizi Ouzou. Les études ont été faites sur la base d'un bilan de consommation journalière établi au niveau de ce site. Cette installation autonome est un système générateur d'électricité destiné à effectuer une tâche bien déterminée. Autrement dit, il sert à couvrir les besoins énergétiques des sites isolés dans notre cas ceux de l'habitation en question. Ce système nécessite des modules photovoltaïques qui représentent le champ de captage des rayons solaires, des batteries où nous stockons l'énergie produite par ces modules, un régulateur qui protège la batterie contre la surcharge et qui règle ainsi la valeur de la tension nominale, un onduleur qui assure la conversion du courant continu en courant alternatif, et de câblage qui relie les différents composants de ce système.

Afin de réussir une installation photovoltaïque autonome, nous avons mené une étude détaillée concernant la méthode de dimensionnement du système photovoltaïque en tenant compte de sa consommation estimée à partir des appareils électriques disponibles au niveau de cette maison. Notre système autonome, est formé de plusieurs modules photovoltaïques d'une puissance nominale de 100 Wc destinés à l'alimentation des appareils électriques qui consomment quotidiennement une énergie électrique constante pendant toute l'année. Pour un besoin énergétique de 8,481 KWh/jours, nous avons opté pour l'utilisation de 27 modules combinés entre eux.

La puissance crête totale de notre système est estimée en tenant compte des pertes quand il fait sombre ou pendant l'insuffisance du rayonnement solaire. L'alimentation électrique des appareils se réalise exclusivement depuis le champ de stockage. Par conséquent, nous avons choisi des batteries dont les caractéristiques sont performantes. De plus afin de garantir la protection et le fonctionnement du parc de stockage, nous avons prévu un régulateur de charge.

La présence de l'onduleur dans notre application a pour but de convertir le courant continu, produit par les panneaux photovoltaïques, en courant alternatif qui sera distribué aux appareils électriques.

Pour optimiser le fonctionnement de l'installation photovoltaïque sur le site choisi, notre installation doit répondre aux critères suivants :

- Incliner le champ photovoltaïque de 46,42 °qui représente l'angle optimal permettant de capter une énergie quasi-constante le long de l'année, vérifiant un fonctionnement

# Conclusion générale

pratiquement stable, assurant ainsi un bon rendement et une augmentation de la durée de vie du système de stockage.

- Assurer un service de maintenance qui consiste en :
  - Un nettoyage des faces des modules photovoltaïques avec une vérification des supports et des connexions.
  - Contrôle de l'aspect concernant les batteries fermées : pas de trace de l'électrolyte en surface ce qui indiquerait une forte surcharge avec perte d'acide.
  - Vérification de l'état de charge pour le régulateur : les indicateurs doivent être cohérents avec l'état de la batterie.

# Référence

## Bibliographique

- [1] Etude des faisabilités techniques de la centrale de Oued N'echou (Ghardaïa) - documentation interne de la société SKTM, Ghardaïa.
- [2] Yves JANNOT « **thermique solaire** », édition mars 2011.
- [3] Helali Kamelia « **Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative** », Mémoire de magister, département d'électrotechnique, faculté du génie électrique, UMMTO 2012.
- [4] Amina Benhammou « **Optimisation d'un nouveau système de séchage solaire modulaire pour plantes aromatiques et médicinales** », Thèse de doctorat. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen 2010.
- [5] Jacques Bernard « **énergie solaire calculs et optimisation** » édition ellipses, 2004
- [6] Anne Labouret et Michel Villos « **Energie solaire photovoltaïque** ». 4<sup>em</sup> édition Dunod, Paris, 2009.
- [7] Rorni Abdelhalim « **Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la Puissance maximale d'un panneau solaire** », Mémoire de magister, département d'électrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [8] Zouache Foudil « **étude de la concentration solaire sur les performances des Systèmes photovoltaïque** », Mémoire de magister, département d'électronique. Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [9] Chirifi Oussama, Madache Hamza « **Etude technico-économique d'une installation photovoltaïque pour une carrière** », Mémoire de mastère II, département de génie mécanique, faculté du génie de la construction, UMMTO 2013.
- [10] Angel Cid Pastor « **Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques** », thèse de doctorat. Institut National Des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [11] C. Lerouge « **Recherche & Industrie Photovoltaïque (PV) Etats-Unis** » Sciences physique États-Unis, 2006.

[12] Charly Cornu « **Centrales photovoltaïques (Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets A l'usage des bureaux d'ingénieurs)** », office fédéral des questions conjoncturelles, 1996.

[13] M. Kenane, S.Sadoudi « **Modélisation de modules photovoltaïques en milieu réel d'implantation** », Mémoire de Master II, département de génie mécanique, faculté du génie de la construction, UMMTO 2013.

[14] Petibon Stéphane « **Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques** ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.

[15] Alonso Corinne « **Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie** ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003.

[16] Belaiche Hacene, Nanouche Yacine « **Etude d'une installation en énergie photovoltaïque intégrée au bâtiment : cas d'un laboratoire au CDER** ». Mémoire de mastère II, département de génie mécanique, faculté du génie de la construction, UMMTO 2014.

[17] Sylvain Brigand « **Installations Solaires Photovoltaïque (dimensionnement de l'installation et mise en œuvre maintenance)** », Edition le moniteur (paris), février 2011

[18] Belhadj Mohammed, « **Modélisation d'un Système de Captage Photovoltaïque Autonome** », Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar, Institut des Sciences Exactes, 2008.

[24] Cours sonelgaz « **l'énergie solaire photovoltaïque** », documentation SKTM, Ghardaïa

[25] R. Rezoug, A. Zaatri, « **Optimisation du rendement d'un système photovoltaïque par poursuite du soleil** », Revue des Energies Renouvelables 12, 299 – 306, 2009.

[26] S. Brigand, « **Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque** », complément technique, Techniques de construction, www.editiondumoniteur.com, Mars-Avril 2008.

[27] A. Labouret, M. Viloz, « **Energie solaire photovoltaïque** », 3<sup>ème</sup> édition, Edition Dunod 2005.

[28] A. Ricaud, « **Modules et systèmes photovoltaïques** », Septembre 2008.

[29] M. J. T. Nkouimi, « **Outil d'aide au dimensionnement des systèmes photovoltaïques domestiques** », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé, © Mémoire Online 2000-2010.

[31] TRAHI Fatiha, « **Prédiction de l'irradiation solaire globale pour la région de Tizi-Ouzou par les réseaux de neurones artificiels** », département d'électronique, faculté du génie électrique, 2011.

## Liens utiles

[19] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur\\_nickel-hydrure\\_m%C3%A9tallique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_nickel-hydrure_m%C3%A9tallique)

[20] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur\\_lithium-ion](https://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_lithium-ion)

[21] <https://www.quelleenergie.fr/questions/capacite-duree-vie-batteries-solaires>

[22] <https://www.google.dz/search?q=%2Bquels%2Bsons%2Bles%2Bcrit%C3%A8res%2Bde%2Bchoix%2Bd%27une%2Bbatterie%2Bsolaires>

[23] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Bo%C3%ABte\\_de\\_jonction](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bo%C3%ABte_de_jonction)

[30] <http://notresolairephotovoltaique.e-monsite.com/medias/images/structure-1.cellule>