

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

**Mémoire de Fin d'Etudes
de MASTER ACADEMIQUE**
Filière : Génie Electrique
Spécialité : **MATERIAUX ET DISPOSITIFS
ELECTRONIQUES ET PHOTOVOLTAIQUES.**

Présenté par
**Djaffer CHERFI
Anis MOUZAOU**

Thème
**Dimensionnement d'un kit
photovoltaïque autonome**

Mémoire soutenu publiquement le 09/07/ 2015 devant le jury composé de :

M Rachid ZIRMI

Maitre de conférences B, UMMTO, FGEI, Président

Mme Kahina LAGHA

Maitre de Conférences A, UMMTO, FGEI, Encadreur

Mme Ouiza BOUGHIAS

Maitre Assistante A, UMMTO, FGEI, Examineur

Mme Farida NEMMAR

Maitre de Conférences B, UMMTO, FGEI, Examineur

Titre: « Dimensionnement d'un kit photovoltaïque autonome »

Résumé :

De nombreuses méthodes de dimensionnement ont été développées pour avoir des systèmes photovoltaïques fiables avec un rendement plus élevé, tout en essayant d'avoir le prix le plus bas possible. Et pour cela un calcul précis de la charge de l'orientation et l'angle d'inclinaison du champ photovoltaïque ainsi que le choix des équipements à utiliser est nécessaire.

Dans notre travail nous avons proposé un dimensionnement d'un kit photovoltaïque avec une autonomie de trois jours avec le moindre coût possible, afin d'avoir un prix du KW/h plus bas que celui proposé par SONELGAZ sur les 20 ans de durée de vie de notre kit.

Mots-clés :

Cellule solaire, Système photovoltaïque, Rayonnement, Angle d'inclinaison, Dimensionnement, Irradiation Solaire, Kit photovoltaïque.

Remerciements

Nous adressons nos remerciements aux personnes qui nous ont aidés dans la réalisation de ce mémoire.

*En premier lieu, nous remercions notre encadreur **Mme Kahina LAGHA**, pour son encadrement efficace, son soutien, et sa disponibilité. Qu'elle trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à **M Rachid ZIRMI**, pour avoir accepté la présidence du jury.*

*Nos remerciements vont également à **Mme Farida NEMMAR** et **Mme Ouiza BOUGHIAS** en reconnaissance d'avoir accepté de faire partie du jury.*

Enfin nous remercions, tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire, ainsi que tous ceux qui ont participé à notre formation.

Je dédie ce travail

*A Mes très chers parents, pour leur sacrifice et leur dévouement pour
mon bonheur.*

A Mes frères et ma sœur pour leurs soutiens et leurs amours.

A Mes petits cœurs: Wardia, Amina et Belkacem .

A Tous mes amis de la promotion, sans oublier ceux de Blida.

A mon binôme ANIS MOUZAOUI.

A Tous ceux qui m'aiment.

DJAFFER CHERFI

Je dédie ce travail

A mes parents, qui m'ont encouragé durant toutes ces années et qui n'ont ménagé aucun effort pour m'apporter le nécessaire à la réussite de mes études.

A ma sœur Kahina.

A ma famille et aux familles BELFENDES et ABES.

A tous ceux qui m'ont aidé durant ces deux dernières années à Tizi-Ouzou, et spécialement à mon oncle Ali et Mr IMACHE enseignant au département d'électrotechnique.

A tous mes amis sans oublier mes amis de la promotion et ceux de l'université de SKIKDA

A mon binôme et ami Djaffer CHERFI

A tous ceux qui m'ont toujours soutenu et encouragé

Anis MOUZAOU

Liste des figures

I- Généralités

Figure I-1: Les différents domaines du spectre électromagnétique	3
Figure I-2 : le nombre d'air masse en fonction de la position du soleil.....	4
Figure I-3 : Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle en kWh/m ² /jour sur un plan horizontal	4
Figure I-4 : les différents types de rayonnement	6
Figure I-5 : la jonction PN a l'équilibre.	8
Figure I-6 : structure d'une cellule photovoltaïque	9
Figure I-7 : Les différentes couches d'une cellule solaire en Si	10
Figure I-8 : Schéma équivalent d'un photogénérateur couplé à un récepteur.....	10
Figure I-9 : Caractéristique (I-V) de la cellule photovoltaïque	12
Figure I-10 : la caractéristique résultante obtenue en associant en série des cellules identiques.	13
Figure I-11 : la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles des cellules identiques	14
Figure I-12 : caractéristique résultante obtenue en associant, en série et en parallèle cellules identiques.	14

II- le système photovoltaïque autonome

Figure II-1: les différents composants d'un système photovoltaïque autonome.....	18
Figure II-2 : schéma synoptique d'un système photovoltaïque autonome.....	19
Figure II-3 : processus de charge et de décharge d'une batterie au plomb.	24
Figure II-4 : Courbe caractéristique P(V) et I(V) d'un module photovoltaïque.	29
Figure II-6 : la charge du vent et de la neige sur la structure porteuse des panneaux	36
Figure II-7 : structure porteuse du panneau photovoltaïque sur la charpente du toit	38

IV- Dimensionnement d'un kit photovoltaïque autonome

Figure IV-1 : vue de face sur la structure porteuse du kit photovoltaïque	52
Figure IV-2 : vue de coté de la structure porteuse du kit photovoltaïque avec agrandissement sur le point de fixation de la structure.	52

Nomenclature

M_T : l'émittance totale d'un corps noir (en $W m^{-2}$)

T : la température du corps noir (en K)

σ : la constante de Stefan-Boltzmann qui vaut environ $5,67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$.

G : Générateur

D : Diode interne

R_{sh} : Résistance shunt interne (Ω)

R_s : Résistance série interne (Ω)

V : Tension aux bornes du photogénérateur (V)

U : Tension aux bornes de l'utilisation (V)

I : Courant traversant l'utilisation (A)

P_{in} : puissance lumineuse incidente (W).

P_{max} : puissance maximale délivrée (W).

dU : La chute de tension (%)

S : La section de câble utilisée (mm^2)

D : La distance à parcourir (m)

E_T : Energie totale consommée par jour (Wh/J)

$P_{(AC)}$: puissance consommé par les appareils qui fonctionnent en alternatif (W)

$P_{(DC)}$: puissance consommé par les appareils qui fonctionnent en continue (W)

t : temps journalier d'utilisation (h)

F_{CG} : Facteur de correction globale (entre 0,65 et 0,9) la valeur souvent utilisée et 0,75.

G : irradiation globale sur un plan incliné ($Wh/m^2/J$)

V_{bat} : Tension de la batterie, (V)

P_C : puissance crête nécessaire pour alimenter la charge (Wc)

P_{CM} : puissance crête du module photovoltaïque utilisé

S_M : Surface du module, (m^2)

n_b : Nombre d'éléments de batterie

CT : Coût total initial du système

N_{MS} : Nombre des modules en série

N_{MP} : Nombre des modules en parallèle

N_{BP} : Nombre de batteries en parallèle

CT : Coût total

C_0 : Coût indirect

C_B : Coût du parc de stockage

C_{ond} : Coût de l'onduleur, si besoin

D_m : Décharge profonde de la batterie

C_{bat} : Capacité batterie, (Ah)

C_B : Coût de la batterie

C_M : Coût du module

C_{GPV} : Coût du générateur PV

C_{reg} : Coût du régulateur à installer

N_{BS} : Nombre de batteries en série

N_B : Nombre total de batterie

C_{TDV} : Coût total estimé pour une durée de vie de l'installation prévue

C_{RB} : Coût de remplacement (Batteries)

C_{ons} : Consommation annuelle du système

C_{OM} : Coût d'opération et maintenance

η_b : Rendement de la batterie

η_c : Rendement de l'onduleur

C_{acc} : Capacité de la batterie de stockage

η_m : Rendement du module

n_b : Nombre d'éléments de batterie

V_{insta} : Tension d'installation, (V)

V_{bat} : Tension de la batterie, (V)

AUT : Jours d'autonomie, (J)

I_S : le courant de sortie du régulateur (A)

P : puissance totale de la charge lorsque tous les appareils fonctionnent au maximum de leur puissance de fonctionnement (W)

Sommaire

Introduction :	1
Chapitre I : Généralités	
I-1 Le Rayonnement:	3
I-1-1 Définition.....	3
I-1-2 Le nombre de masse d'air.....	3
I-1-3 Les coordonnées terrestres :	5
a- Longitude :	5
b- La latitude :	5
c- L'altitude	5
d- L'albédo :	5
I-1-4 Les différents types de rayonnement	5
a- Rayonnement global :	5
b- Rayonnement diffus	6
c- Rayonnement direct.....	6
I-1-5 Le corps noir :	6
I-2 Principe de fonctionnement de la cellule solaire :	7
I-2-1 Les matériaux semi-conducteurs :	7
Dopage de type N :	7
Dopage de type P :	7
La jonction PN :	7
I-2-2 La cellule solaire :	8
I-2-4 Caractéristiques courant - tension (I-V) de la cellule photovoltaïque :	11
I-2-5 Association des cellules photovoltaïques	13
a- Association en en série	13
b- Association en parallèle :	13
c- Association en hybride :	14
I-3 Association des panneaux photovoltaïques :	15
Association des panneaux photovoltaïque en série :	15
Association des panneaux photovoltaïque en parallèle :	16
Chapitre II : Le système photovoltaïque autonome	
II-1 Le générateur photovoltaïque	19
a- Type de cellules :	19
b- Les cellules monocristallines :	19

c-	Les cellules poly-cristallines :	19
d-	Les cellules amorphes :	20
II-1-2	Les caractéristiques du panneau :	20
II-1-3	Les différents positionnements des panneaux :	21
a-	L'inclinaison :	21
b-	Orientation :	21
II-2	Les régulateurs (ou contrôleurs) de charge :	21
a-	Régulateurs de type séries	22
b-	Régulateurs à commutation solide state (PWM)	23
II-2-1	Choix du régulateur de charge	24
II-3	Système de stockage :	24
II-3-1	Batterie au plomb	24
a-	Décharge d'une batterie au plomb :	25
b-	Autodécharge.....	25
c-	Charge d'une batterie Plomb.....	25
d-	Dégazage	26
II-3-2	Les batteries au gel :	26
a-	Les avantages	26
b-	Les inconvénients	27
II-4	Les onduleurs	28
a-	Caractéristiques propres à un onduleur pour systèmes photovoltaïques (PV) :	28
II-5	Le Câblage :	30
II-6	Les consommateurs :	33
a-	Les lampes :	34
b-	Radio – téléviseurs :	34
c-	Les pompes :	34
d-	Les réfrigérateurs:.....	34
e-	Les ventilateurs :	35
f-	Ordinateur et imprimante :	35
II-7	Les supports.....	35
a-	Installation des structures sur toits plats :	35
Calcul des charges sur les supports :		36
b-	Installation sur toits inclinés :	38
II-8	Protection de l'installation photovoltaïque :	38
a-	Protection contre la foudre :	38
Diode de protection		38

Parafoudre	39
b- Mise à la terre :.....	39
chapitre III : Méthode de dimensionnement	
III- Méthode de dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome :.....	40
III-1 Evaluation de la consommation :.....	40
III-2 Dimensionnement du générateur photovoltaïque :.....	41
III-2-1 Calcul de la taille de la surface photovoltaïque :.....	43
III-2-2 Choisir la tension de fonctionnement du champ photovoltaïque :.....	43
III-3 Dimensionnement du système de stockage :.....	43
III-4 Dimensionnement du régulateur :.....	45
III-5 Dimensionnement de l'onduleur :.....	45
III-6 Calcul du cout de l'installation photovoltaïque :	45
Chapitre IV : Dimensionnement d'un kit photovoltaïque autonome	
IV-1 Application pour le dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome	47
IV-1-1 Evaluation de la consommation :.....	47
IV-1-2 Calcul de l'angle d'inclinaison optimale pour le générateur.....	47
IV-1-3 Dimensionnement du générateur photovoltaïque :.....	48
IV-1-3-a Calcul de la surface du générateur photovoltaïque :.....	48
IV-1-3-b Choisir la tension de fonctionnement du champ photovoltaïque :	48
IV-1-4 Dimensionnement du système de stockage :	49
IV-1-5 Dimensionnement du régulateur :.....	49
IV-1-6 Dimensionnement de l'onduleur :	50
IV-1-7 Dimensionnement économique de l'installation photovoltaïque :	50
IV-2 Application pour le dimensionnement d'un Kit photovoltaïque avec une autonomie de 3 jours .	51
IV-2-1-a Calcul de la surface du générateur photovoltaïque :.....	51
IV-2-1-b Dimensionnement de la structure porteuse des Modules	51
IV-2-1-c Choisir la tension de fonctionnement du champ photovoltaïque :	53
IV-2-2 Dimensionnement du système de stockage :	53
IV-2-3 Dimensionnement du régulateur :.....	54
IV-2-4 Dimensionnement de l'onduleur :	54
IV-2-5 Dimensionnement économique d'un kit photovoltaïque :.....	54
Conclusion :.....	56

Introduction

Introduction :

Le soleil peut satisfaire tous nos besoins si nous apprenons à exploiter rationnellement l'énergie qu'il rayonne vers la terre. Il brille dans le ciel depuis presque 5 milliards d'années et les scientifiques ont calculé qu'il est à la moitié de son existence. Aujourd'hui il paraît insensé de ne pas en profiter car nous avons les moyens technologiques nécessaires. De plus il faut considérer que cette source d'énergie est gratuite, propre et inépuisable. Cette énergie pourrait par ailleurs nous libérer de notre dépendance aux énergies fossiles ou aux autres alternatives peu sûres ou polluantes comme l'énergie nucléaire. Cette énergie peut être directement exploitée ou transformée en électricité. Le choix d'une solution photovoltaïque représente un investissement, dont les temps de retours sont facilement calculables.

Avec un degré de pollution toujours plus inquiétant, contrastent avec les nouvelles dispositions de développement durable, et rendent les sources d'énergie alternative et renouvelable de plus en plus attractives auxquelles il est difficile de renoncer. Les incitations économiques et les énormes pas en avant de la technologie électronique favorisent l'utilisation de systèmes photovoltaïques.

L'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque semble être une nécessité pour l'avenir. En effet, le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la plus abondante sur terre. La quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la planète terre pendant une heure pourrait satisfaire la demande énergétique mondiale pendant une année.

Le taux d'électrification en Algérie est aujourd'hui de 95 %, l'utilisation des installations photovoltaïques autonomes permettra d'atteindre, en particulier, les régions isolées et très éloignées du réseau électrique national.

La réalisation d'une installation photovoltaïque performante et fiable avec le moindre coût possible exige une méthode de dimensionnement précise et cela en prenant en compte les caractéristiques techniques des différents composants qui constituent notre installation et le type de technologie (des panneaux photovoltaïques et des batteries) compatible avec les caractéristiques du lieu de l'implantation (la latitude, la température, l'irradiation solaire ... etc.) en plus d'une étude détaillée de la charge à alimenter.

Dans notre travail on s'intéresse au dimensionnement d'un kit photovoltaïque efficace et stable pour subvenir aux besoins en électricité des régions les plus isolées. Le coût du kit

Introduction

proposé doit rester inférieure au coût d'un éventuel raccordement au réseau SONELGAZ, cette installation doit représenter un investissement sur le long terme pour le propriétaire. Nous avons choisi comme lieu d'implantation pour notre kit la région de Tizi-Ouzou.

Dans le premier chapitre de notre mémoire, nous présentons des rappels sur le rayonnement solaire et l'effet photovoltaïque. Nous détaillerons le principe de fonctionnement d'une cellule solaire ainsi que celui des modules photovoltaïques.

Les différents éléments qui constituent un kit photovoltaïque autonome à savoir les types des panneaux photovoltaïques, les régulateurs, les onduleurs, les batteries seront détaillés au deuxième chapitre.

Le troisième chapitre sera consacré aux méthodes de dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons le dimensionnement d'un kit photovoltaïque autonome qui alimentera une charge de puissance 160 Watts avec une autonomie de trois jours.

I-1 Le Rayonnement:

I-1-1 Définition

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il est composé de toute la gamme des rayonnements, de l'ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques de particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées (figure I-1).

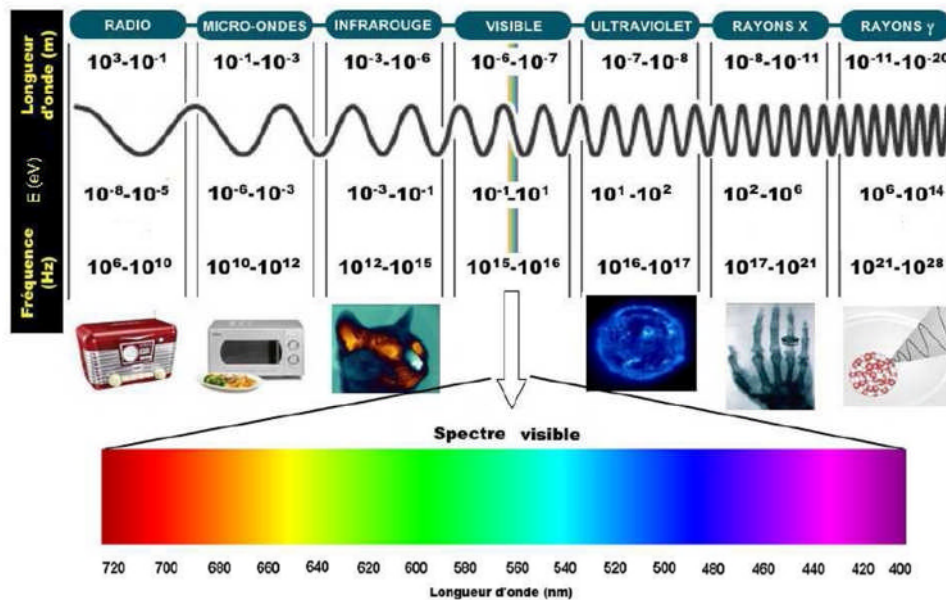


Figure I-1: Les différents domaines du spectre électromagnétique [1]

I-1-2 Le nombre de masse d'air

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par :

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m^2 et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m^2 .

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith) [2]. La figure I-2 présente le nombre d'air masse pour différentes positions du soleil.

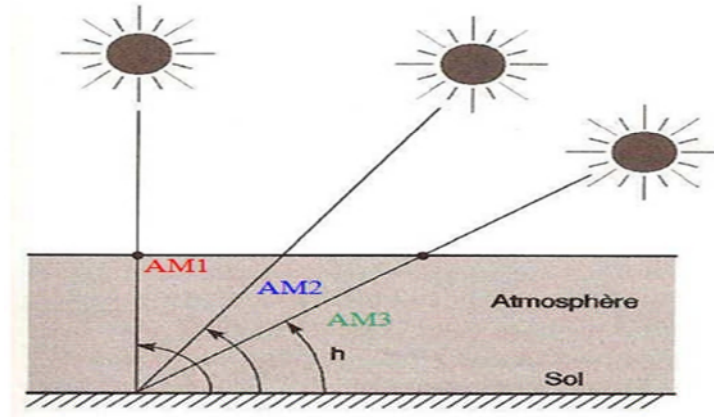


Figure I-2 : le nombre d'air masse en fonction de la position du soleil [3]

L'irradiation solaire dépend de :

- l'orientation et l'inclinaison de la surface,
- la latitude du lieu et son degré de pollution,
- la période de l'année,
- l'instant considéré dans la journée,
- la nature des couches nuageuses.

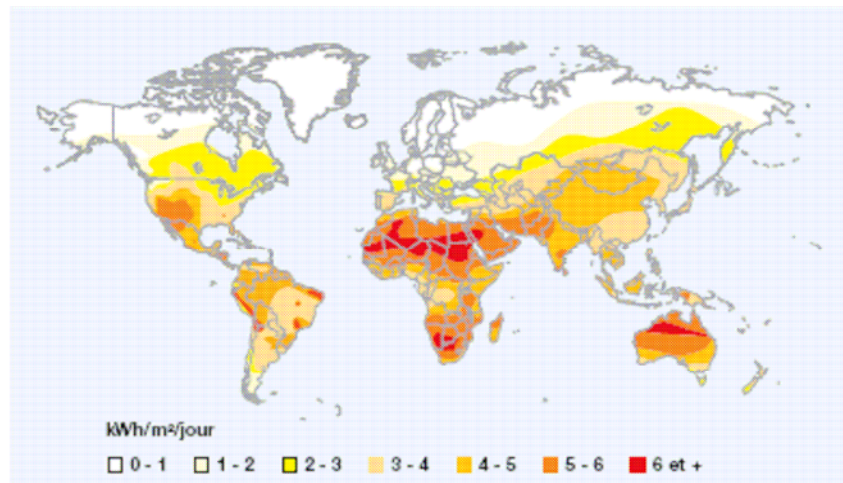


Figure I-3 : Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle en $\text{kWh/m}^2/\text{jour}$ sur un plan horizontal [4]

I-1-3 Les coordonnées terrestres :

La terre est pratiquement une sphère qui tourne autour d'un axe passant par le pôle nord et le pôle sud

Chaque point sur la terre est caractérisé par sa latitude et sa longitude en plus de son altitude.

- a- **Longitude** : 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. Pour les méridiens situés à l'est on affecte le signe (+), et le (-) pour les méridiens situés à l'ouest.
- b- **La latitude** : La latitude d'un lieu est l'angle entre l'équateur et le rayon de la terre passant par le lieu considéré. La latitude est comptée de 0° à +90° pour l'hémisphère nord, et de 0° à -90° pour l'hémisphère sud.
- c- **L'altitude** : L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (niveau de la mer), on l'exprime en mètre.
- d- **L'albédo** : C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol et aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflecteur pour le rayonnement considéré, et pour tous les angles d'incidences possibles. Par définition, le corps noir possède un albédo nul.

$$L'albedo = \frac{\text{énergie réfléchi}}{\text{énergie reçue}}$$

I-1-4 Les différents types de rayonnement

a- Rayonnement global :

Le rayonnement global au sol est en fonction de la composition et de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons lumineux au cours de la journée. Il se décompose de rayonnement diffus et rayonnement direct

b- Rayonnement diffus

Ce sont des rayons qui proviennent de l'atmosphère qu'il fasse beau ou pas ; des rayons lumineux issus du Soleil traversent les nuages et se diffusent sur toute la surface de la terre. Nous pouvons mesurer la longueur d'onde grâce à un pyranomètre.

c- Rayonnement direct

Ce sont des rayons qui proviennent de l'atmosphère mais ce sont surtout les rayons UV du Soleil qui sont mesurés par un pyrhéliomètre (Instrument qui sert à recueillir la puissance émise par le Soleil).

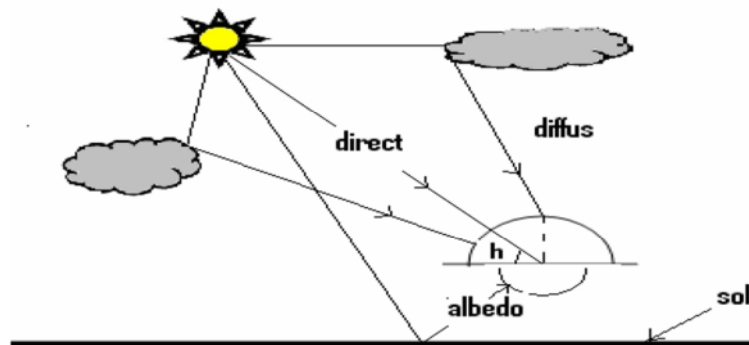


Figure I-4 : les différents types de rayonnement [5]

I-1-5 Le corps noir :

Un corps noir est un corps qui absorbe, sans la réfléchir ni la diffuser, toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit. Ainsi, une boîte avec une toute petite ouverture est généralement une bonne approximation d'un corps noir. Un tel "corps noir" reçoit de l'énergie, s'il n'en émettait pas, sa température augmenterait indéfiniment. Ceci est irréaliste, un corps noir réémet donc l'énergie qu'il a absorbée sous forme de rayonnements électromagnétiques. La quantité d'énergie réémise dépend de sa température. Ainsi, on a la loi de Stefan-Boltzmann qui donne la valeur de l'énergie émise en fonction de la température du corps noir.

$$M_T = \sigma \cdot T^4$$

M_T : l'émittance totale d'un corps noir (en $W m^{-2}$)

T : la température du corps noir (en K)

σ : la constante de Stefan-Boltzmann qui vaut environ $5,67 \cdot 10^{-8} Wm^{-2} K^{-4}$.

I-2 Principe de fonctionnement de la cellule solaire :

I-2-1 Les matériaux semi-conducteurs :

Les matériaux semi-conducteurs sont des matériaux dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Le semi-conducteur le plus utilisé en électronique est le silicium car il est disponible en quantité abondante sur la planète.

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

Dopage de type N :

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent. Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être 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.

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, l'impureté utilisée est souvent du Bore dans la technologie silicium.

La jonction PN :

Une jonction PN est le contact entre un semi-conducteur de type N et un semi-conducteur de type P. les électrons proche du contact du côté N diffusent vers le côté P et laissent des ions fixes chargés positivement. Les trous situés au voisinage du côté P diffusent vers le côté N et laissent des ions fixes chargés négativement. A l'équilibre thermodynamique, il y aura apparition d'un champ électrique interne dirigé de N vers P qui s'oppose à la diffusion des porteurs de charges majoritaires et favorise la diffusion des porteurs minoritaires.

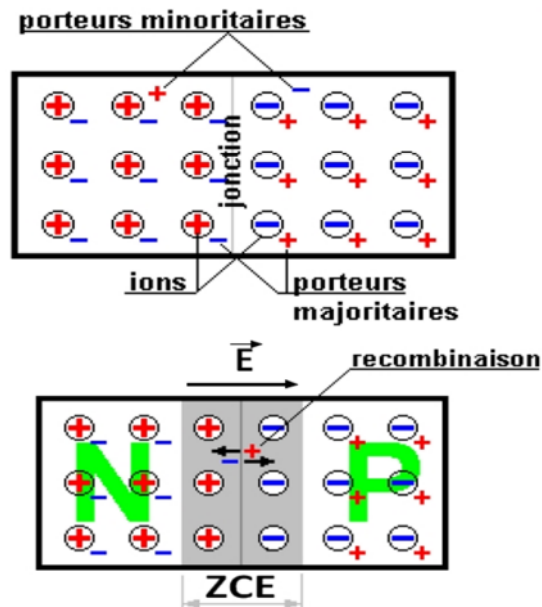


Figure I-5 : la jonction PN a l'équilibre.

I-2-2 La cellule solaire :

La cellule photovoltaïque, aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Il s'agit d'un dispositif composé essentiellement de semi-conducteurs qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable, le soleil. Elle exploite les propriétés électriques et optiques des matériaux semi-conducteurs.

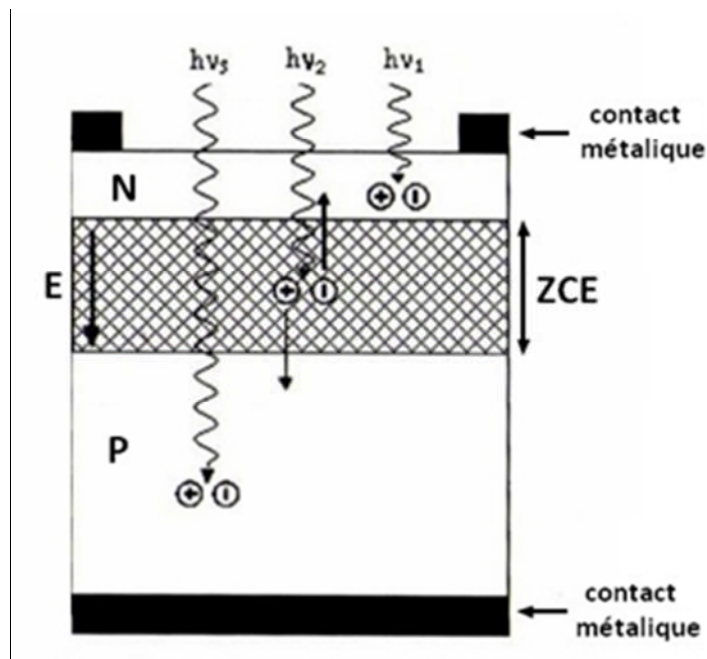


Figure I-6 : structure d'une cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé par la cellule photovoltaïque composé de semi-conducteurs dopés p (+) et n (-), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente. Quand un photon d'énergie $E = h\nu$ est supérieure à celle du gap du semi-conducteur atteint la zone de charge d'espace et son voisinage, il crée des paires électron-trou (e^+, e^-), le champs électrique interne (présent dans la ZCE) sépare ces paires. Les électrons sont dirigés vers le coté N et les trous vers le coté P.

La face supérieure de la cellule est traitée de manière à optimiser la quantité de lumière entrant dans la cellule au moyen de traitement de surface, par l'application d'une couche anti réflexion. Les faces supérieure et inférieure sont équipées d'électrodes pour récolter les électrons.

Il existe différentes technologies de cellules photovoltaïques. Les différences entre elles se situent au niveau des matériaux utilisés et des procédés de fabrication.

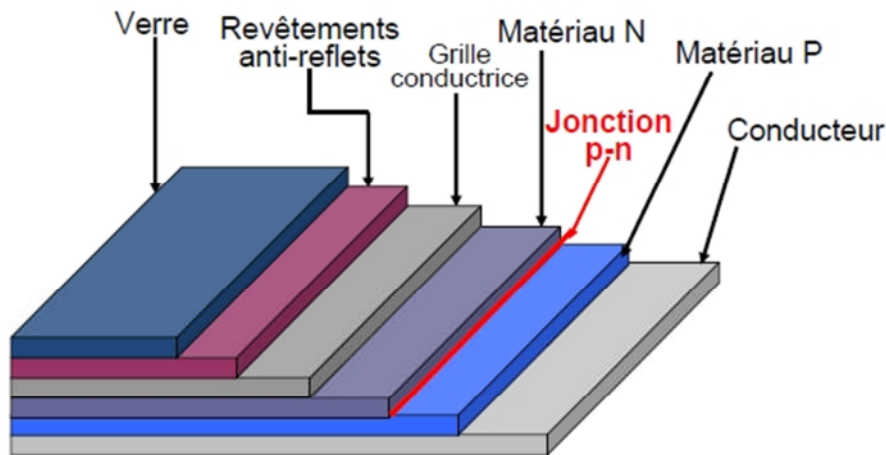


Figure I-7 : Les différentes couches d'une cellule solaire en Si [6]

I-2-3 Le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque :

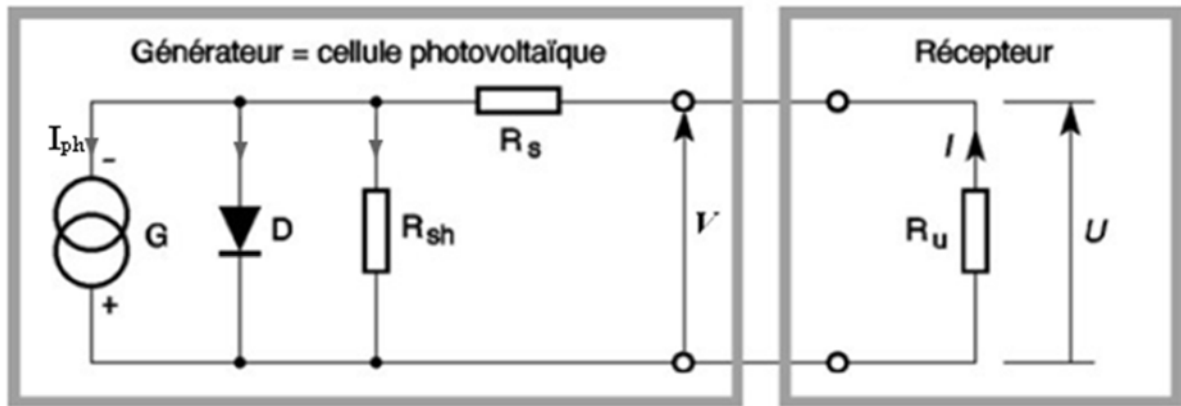


Figure I-8 : Schéma équivalent d'un photogénérateur couplé à un récepteur.

G : Générateur **D** : Diode interne **R_{sh}** : Résistance shunt interne

R_s : Résistance série interne **V** : Tension aux bornes du photogénérateur

U : Tension aux bornes de l'utilisation

I : Courant traversant l'utilisation

G est une source de courant parfaite.

D est une diode idéale.

R_{sh} est une résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui interviennent entre les bornes opposées positive et négative d'une photopile (microcircuits dans le silicium en particulier).

R_s est une résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance intrinsèque des couches, résistance des contacts).

R_u est l'impédance du récepteur qui impose le point de fonctionnement sur la photopile en fonction de sa caractéristique courant- tension à l'éclairement considéré (dans le cas où le récepteur est assimilable à un résistor).

L'équation du modèle du générateur photovoltaïque est donné par :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q \cdot V + I \cdot R_s}{mKT}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}}\right)$$

I-2-4 Caractéristiques courant - tension (I-V) de la cellule photovoltaïque :

A partir de la caractéristique I-V sous éclairage de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment :

- **Le courant de court circuit :**

L'expression approchée du courant de court-circuit est :

$$I \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right)}$$

D'où : $I_{cc} \approx I_{ph}$ dans le cas idéal.

- **Tension de circuit ouvert :**

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur PV). Son expression est déduite de l'équation suivante:

$$I_{ph} - I_0 \left(\exp \left[\frac{V_{co}}{V_T} \right] - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \right) = 0$$

Dans le cas idéal ($R_s \rightarrow 0, R_{sh} \rightarrow \infty, I_{ph} = I_{cc}$) on obtient :

$$V_{\infty} = V_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right)$$

- **Le facteur de forme :**

Quant au facteur de forme FF, dit aussi facteur de remplissage, il est défini par :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}}$$

Ce facteur montre la déviation de la courbe $I = f(V)$ par rapport à un rectangle (de longueur V_{co} et largeur I_{cc}) qui correspond à la photopile idéale (figure I-9).

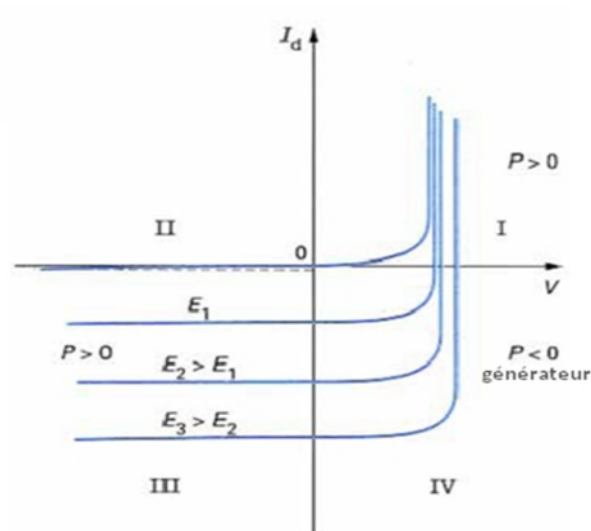


Figure I-9 : Caractéristique (I-V) de la cellule photovoltaïque

Le rendement photovoltaïque :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{FF \cdot I_{\text{cc}} \cdot V_{\text{co}}}{P_{\text{in}}}$$

P_{in} : puissance lumineuse incidente (W).

P_{\max} : puissance maximale délivrée (W).

I-2-5 Association des cellules photovoltaïques

a- Association en en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. (Augmentation de la tension) [7]

Chaque cellule nécessite d'une protection pour éviter qu'une pile fonctionne en récepteur (diodes placées en parallèle). La figure 9 présente la caractéristique courant-tension d'une association en série de cellules solaires identique.

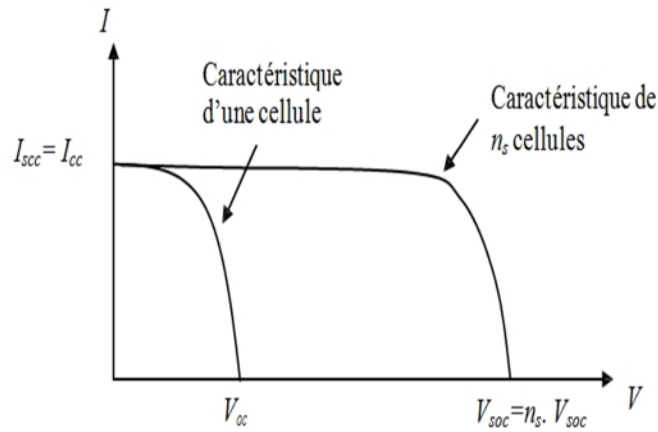


Figure I-10 : la caractéristique résultante obtenue en associant en série des cellules identiques.

b- Association en parallèle :

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée (augmentation dans le courant).

Nécessité d'une protection pour éviter qu'une pile fonctionne en récepteur. (Diodes placées en série). La figure 10 présente la caractéristique courant-tension d'une association en parallèle de cellules solaires identique.

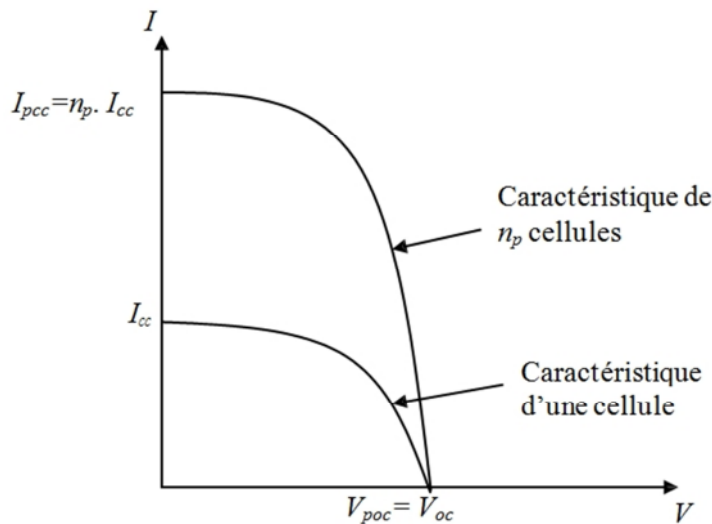


Figure I-11 : la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles des cellules identiques

c- Association en hybride :

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de Court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations :

$$I_{cc}^t = n_p \times I_{cc}$$

$$V_{oc}^t = n_s \times V_{oc}$$

n_p : nombre de cellule en parallèle, n_s : nombre de cellule en serie

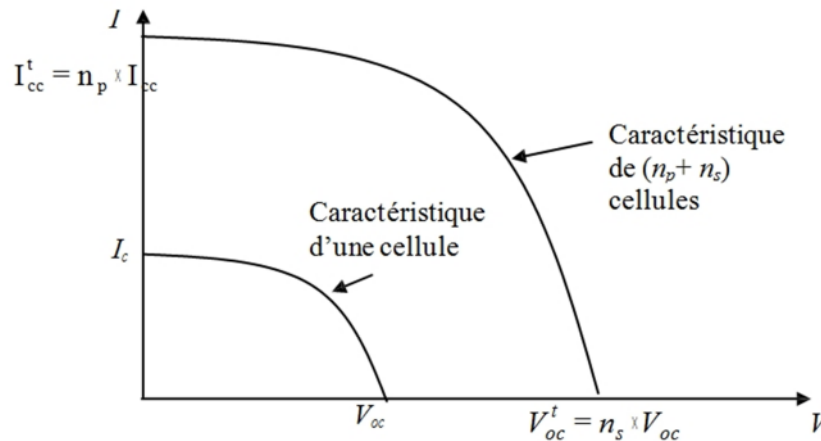
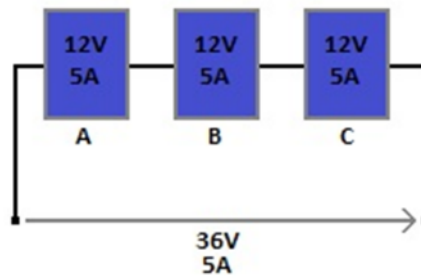


Figure I-12 : caractéristique résultante obtenue en associant, en série et en parallèle cellules identiques.

I-3 Association des panneaux photovoltaïques :

Le raccordement des appareils électriques en série ou en parallèle permet de modifier la tension dans le premier cas, et l'intensité dans le second. Les appareils en série sont placés les uns derrière les autres, et sont traversés par le même courant. Pour les appareils en parallèle, le courant se divise afin de les traverser simultanément. Ce phénomène est valable pour des appareils ne produisant ou ne consommant que du courant continu (DC).

Association des panneaux photovoltaïque en série :



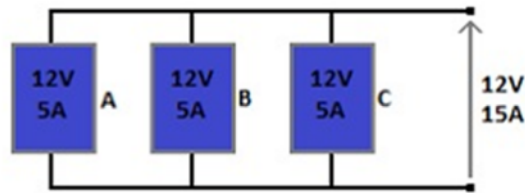
Un générateur électrique augmente le potentiel des électrons. Autrement dit, il leur transmet de l'énergie, ce qui se traduit par une addition de tension. Dans un branchement en série, les électrons vont traverser les générateurs les uns après les autres, et leur potentiel augmentera à chaque fois. Les hausses de tension vont donc s'accumuler.

L'avantage de ce branchement en série est qu'il permet d'obtenir la tension que l'on souhaite. Par exemple, pour limiter les pertes dans les câbles lors du transport de l'électricité, il est préférable d'avoir une tension élevée et une intensité réduite. A puissance équivalente, cela permet de réduire les pertes par "effet Joule", ou de réduire la section des câbles (plus économique).

D'autre part, mêmes si les tensions des générateurs sont différentes, elles peuvent toujours s'additionner. On peut très bien mettre en série un module photovoltaïque de 12V avec un autre de 48V. On obtiendra alors 60V en sortie.

Il y a cependant des inconvénients à mettre des générateurs en série, notamment en ce qui concerne l'intensité maximal que peut délivrer le système. En effet, c'est le générateur ayant l'intensité la plus faible qui l'imposera à tous les autres. Si les générateurs n'ont pas tous la même intensité, il s'agit donc d'une perte de puissance importante car certains ne seront pas utilisés au maximum de leur capacité.

Association des panneaux photovoltaïque en parallèle :



Dans un branchement en parallèle, les électrons ne traversent qu'un seul générateur. Ils ne subissent donc qu'une seule élévation de tension. Chaque générateur crée une hausse de tension, mais jamais sur le même électron. Dans notre exemple, nous avons mis trois modules photovoltaïques de 12V en parallèle. Le courant se divise en trois groupes d'électrons qui traversent chacun un module différent. Le premier groupe d'électrons traverse le module A tandis qu'au même instant, le deuxième et le troisième groupe traversent respectivement les modules B et C. Au final, tous les électrons ont obtenu 12V.

L'avantage de ce branchement en parallèle est qu'il permet d'augmenter l'intensité du courant. On dispose donc d'une puissance plus grande pour une tension donnée. Par exemple, la plupart des récepteurs électriques qui fonctionnent en courant continu utilisent une tension de 12V. Si plusieurs modules photovoltaïques 12V sont raccordés en série, la tension sera de 24V, 36V ou 48V et ne sera plus compatible avec nos appareils qui consomment du 12V. Dans ce cas, à moins de disposer d'un convertisseur de courant, il n'y a pas d'autre choix que de brancher les modules en parallèle au lieu de les mettre en série. De plus, on peut mettre en parallèle des générateurs ayant des intensités différentes. Les intensités de chaque générateur s'additionnent.

Autre avantage du branchement en parallèle: lorsqu'un générateur est hors service, les autres peuvent tout de même fonctionner (contrairement au branchement série). La perte de puissance est donc limitée à celle du générateur défectueux.

Le gros inconvénient de ce montage concerne la tension maximum qu'il peut délivrer. En effet, c'est le générateur ayant la plus faible tension qui l'imposera à tous les autres en parallèle avec lui. Dans un premier temps, il s'agit donc d'une potentielle perte de puissance. Mais, dans certains cas, cela peut même devenir dangereux. Par exemple, si on décide de brancher deux batteries ayant des tensions différentes, celle qui possède la plus forte se videra

dans l'autre en créant un court circuit, une surcharge, et une destruction prématurée. Il est donc très fortement déconseillé de brancher en parallèle des générateurs de tension différente.

II- Système photovoltaïque Autonome :

Le système photovoltaïque autonome est composé de :

- Générateur photovoltaïque
- Système de protection (Fusible, mise à la terre)
- Système de stockage
- Régulateur
- Onduleur
- La charge (a courant alternatif, courant direct)

La figure présente les différents composants d'un système photovoltaïque autonome

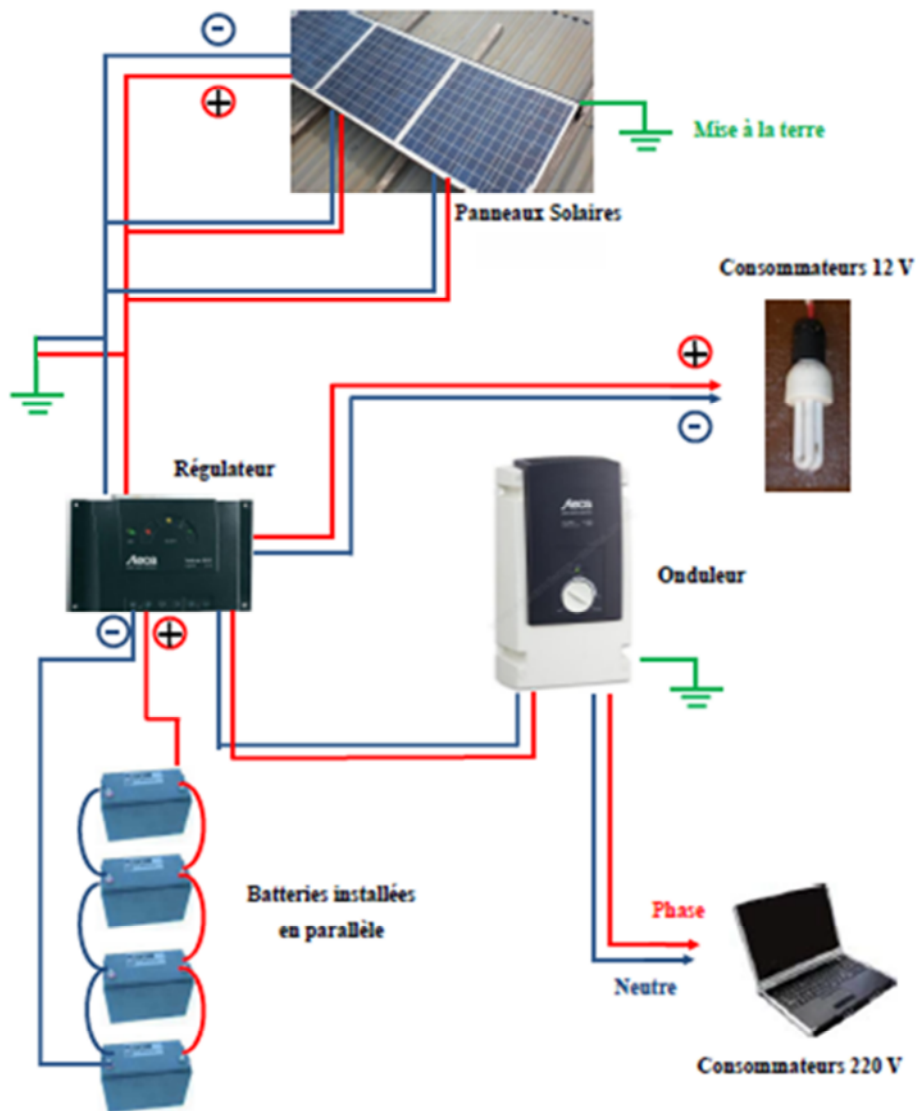


Figure II-1: les différents composants d'un système photovoltaïque autonome.

Le schéma synoptique du système est représenté dans la figure II-2

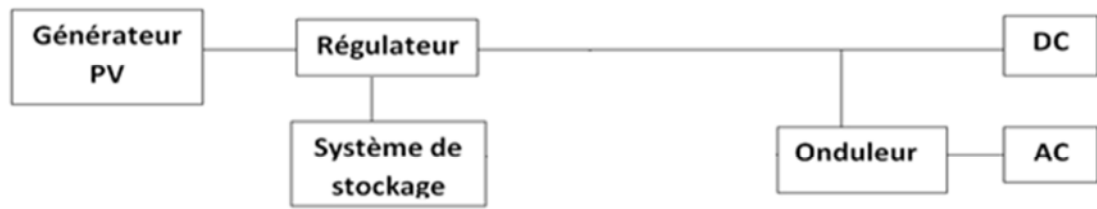


Figure II-2 : schéma synoptique d'un système photovoltaïque autonome.

II-1 Le générateur photovoltaïque

a- Type de cellules :

Un panneau photovoltaïque est composé de cellules branchées en série et/ou en parallèle. Ces cellules sont soudées les unes aux autres, traditionnellement sur leur face avant (il existe aussi des panneaux dont les soudures sont faites sur la face arrière, ces panneaux sont appelés "back contact", ils offrent en général un rendement supérieur de 10% grâce à la surface économisée sur la face avant).

b- Les cellules monocristallines :

Elles sont issues d'un seul bloc de silicium fondu, elles sont donc très "pures". mais sont aussi plus chères à la production, donc à la vente. Ces cellules sont en générale octogonales et d'une couleur uniforme foncée (bleu marine ou gris).

La première génération de photopiles est caractérisé par :

Un taux de rendement excellent (12-16%) (23% en Laboratoire) ;

Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère ;

Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur;

c- Les cellules poly-cristallines :

Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux. Les cellules sont en générale de forme rectangulaire et sont bleu nuit avec des reflets.

Les caractéristiques des cellules poly-cristallines :

Coût de production moins élevé.

Procédé nécessitant moins d'énergie.

Rendement 11-13% (18% en Labo).

d- Les cellules amorphes :

Elles sont produites à partir d'un "gaz de silicium", qui est projeté sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires », car ce type de cellule est bon marché et la technologie est utilisable sur de nombreux supports, notamment des supports souples. Elles sont caractérisée par

Un coût de production bien plus bas.

Un rendement plus bas : 8-10% (13% en labo).

Une durée de vie plus faible.

C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les produits de consommation comme les calculatrices, les montres etc.... Toutefois, ils réagissent mieux à des températures élevées ou à une lumière diffuse. De plus, les cellules mono et poly-cristallines sont les types de cellules les plus répandues sur le marché du photovoltaïque (environ 60% de la production).

II-1-2 Les caractéristiques du panneau :

Les caractéristiques du panneau sont en général indiquées sur une étiquette collée à l'arrière du panneau.

Les grandeurs électriques indiquées sont:

-Courant de court-circuit (short circuit current) I_{sc} - l'intensité est mesurée directement aux bornes du module sans récepteur.

-Courant nominal (peak power ou rated current) I_{mp} - l'intensité qui est débitée en fonctionnement STC raccordé au récepteur.

-Tension de circuit ouvert (open circuit voltage) V_{oc} - la tension est mesurée directement aux bornes du module sans charge.

-Tension nominale (peak power ou rated voltage) V_{mp} - la tension délivrée en fonctionnement STC(les condition standards des test) raccordé au récepteur.

-Puissance crête (peak power ou rated power) P_{max} – la puissance crête est le produit de la tension nominale et le courant nominal en fonctionnement STC:

Puissance crête = tension crête X courant crête

$$P_{max} = V_{mp} \times I_{mp}$$

II-1-3 Les différents positionnements des panneaux :

a- L'inclinaison :

On inclinera le module sur la base de la valeur de la latitude, ce qui constitue un bon compromis été/hiver pour une production annuelle.

α = angle correspondant à la latitude du site d'implantation φ .

Il est nécessaire de conserver une inclinaison minimale de 5° pour assurer l'écoulement des eaux pluviales et l'auto nettoyage des modules en particulier pour les sites a moins de 10° de latitude nord ou sud, c'est-a-dire proche de l'équateur.

Pour augmenter l'énergie récupérée en hiver au détriment de celle récupérée en été on utilise un degré d'inclinaison supérieur à celui de la latitude.

Le tableau suivant donne les valeurs de l'inclinaison idéale des capteurs photovoltaïque pour une utilisation annuelle constante en fonction de la latitude.

Latitude φ ($^\circ$)	Inclinaison α ($^\circ$)
$\varphi < 10^\circ$	10°
$10^\circ < \varphi < 30^\circ$	φ
$30^\circ < \varphi < 40^\circ$	$\varphi + 10^\circ$
$\varphi > 40^\circ$	$\varphi + 15^\circ$

Tableau II-1 : Relation entre la latitude et l'inclinaison des panneaux pour une utilisation annuelle

b- Orientation :

Les modules doivent être orientés : Plein sud dans l'hémisphère nord, Plein nord dans l'hémisphère sud. On peut toutefois se permettre une tolérance de 45° est/ouest.

II-2 Les régulateurs (ou contrôleurs) de charge :

Un régulateur de charge appelé aussi contrôleur de charge, est un système ou appareil électronique fonctionnant de façon complètement automatique auquel sont raccordés le générateur (panneaux solaires, éolienne, etc.) la batterie ainsi que d'éventuels équipements ou composants de l'installation.

Le régulateur de charge principale sert avant tout à contrôler l'état de la batterie. Il permet, en effet, d'assurer la charge complète de la batterie et prévient de tout risque de surcharge de

celle-ci en stoppant l'alimentation de cette dernière lorsque cela s'avère nécessaire. Ce mécanisme de régulation consiste à surveiller en permanence l'état de charge de la batterie.

Le régulateur coupe l'alimentation du générateur lorsque l'état de charge de la batterie atteint l'une des valeurs limites correspondant au déclenchement de la sécurité. Il existe plusieurs valeurs limites correspondant chacune à un type de protection différent : surcharge, décharge profonde, température de fonctionnement, court-circuit, etc. Cette surveillance et cette protection permanente permettent ainsi de prolonger de façon importante les performances et la durée de vie des batteries.

Les régulateurs standards couramment utilisés sur le marché proposent en général un ensemble de protections dites "classiques" telles que : protection contre la surcharge, protection contre la décharge profonde, protection contre les courts-circuits, protection du générateur, protection thermique (sonde), etc.

La plupart de ces régulateurs sont équipés de voyants ou témoins lumineux destinés à fournir un ensemble d'indications telles que : l'état de charge de la batterie, l'état de fonctionnement du générateur, le mode de fonctionnement en cours, l'état des différentes protections, etc.

Les nouvelles générations de régulateurs "haut de gamme", quant à eux, sont de plus en plus perfectionnées et proposent des fonctionnalités plus nombreuses et de plus en plus évoluées.

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

Contrairement à certains générateurs, les panneaux solaires photovoltaïques peuvent être court-circuités ou peuvent voir leur circuit s'ouvrir sans dommage. Avec les régulateurs de type Séries le courant de charge des batteries est occasionnellement coupé par l'ouverture d'un circuit entre les panneaux solaires photovoltaïques et les batteries. Avec les régulateurs de type Shunt, le courant de charge des batteries est dévié vers une résistance et un court-circuit est effectué au niveau des panneaux solaires photovoltaïques.

a- Régulateurs de type séries

Selon la taille de l'installation photovoltaïque, un régulateur simple ou à relais multiples peut être utilisé. Ces régulateurs ouvrent simplement un ou plusieurs relais selon la tension des batteries, afin de réduire la charge, ou de l'arrêter complètement. Les régulateurs contrôlent aussi les courants de l'ordre de 40 à 50 ampères provenant des panneaux solaires photovoltaïques. L'ouverture et la fermeture de ces relais est réalisée en fonction des seuils de tensions maximum et minimum prédéterminés. Pour des régulateurs à relais multiples, un

relais peut rester fermé pour maintenir une charge complète, en alimentant les batteries via un circuit de puissance ou un circuit électronique linéaire. [8]

Pour les systèmes dont les courants de sortie excèdent 50 ampères, les régulateurs doivent comporter plus d'un relais (au mercure de préférence), branché à un ensemble ou des régulateurs individuels, offrant l'avantage d'un système parallèle opérant indépendamment, avec une bonne fiabilité.

b- Régulateurs à commutation solide state (PWM)

Ces régulateurs utilisent des MOSFET ou des transistors de puissance fonctionnant à des fréquences importantes, afin de générer des impulsions, pour maintenir les batteries à une tension constante. La durée d'un cycle d'impulsion utilisée dans les régulateurs types Séries ou Shunt, varie en fonction de la tension des batteries et du courant de charge. Ces régulateurs ont une excellente caractéristique de charge pour les systèmes photovoltaïques jusqu'à 40 ampères; cependant, à cause de leur grande commutation, ils peuvent générer des fréquences pouvant interférer avec les équipements de télécommunication.

Les relais utilisés dans les régulateurs ont quelques limites qui affectent leur durée de vie. Pour prolonger celle-ci, il faut allonger leur cycle d'ouverture et de fermeture, entravant par conséquent les performances des batteries. Lorsque le courant de charge est grand, ces relais nécessitent un circuit de dérivation pour supporter temporairement le courant pendant le cycle. Les circuits de commutation des régulateurs solide state feront indéfiniment des cycles d'impulsions sans dommage. Cependant, la chute de tension à leurs bornes génère de la chaleur.

La modulation de Largeur d'Impulsion (PWM) est une méthode très rapide et efficace qui permet d'atteindre l'état de pleine charge d'une batterie solaire. Contrairement aux contrôleurs plus anciens qui n'agissaient sur le courant de charge que par ON ou OFF (ce qui est suffisant pour restaurer l'état de charge d'une batterie à environ 70%), le régulateur à technique PWM vérifie constamment l'état de charge de la batterie pour ajuster la durée et la fréquence des impulsions de courants à lui délivrer. Si la batterie est déchargée, les impulsions de courant sont longues et presque ininterrompues. Quand la batterie est presque entièrement chargée, les impulsions deviennent de plus en plus brèves et espacées.

Par sa nature même, cette technique achève la dernière portion du processus de la recharge (la plus complexe) et diminue la sulfatation des plaques car le courant de charge de la batterie est pulsé à haute fréquence.

II-2-1 Choix du régulateur de charge

Trois facteurs sont importants dans le choix d'un régulateur de charge: il s'agit de la tension du système, la température d'opération et le courant maximal. Concernant le courant, il faut additionner tous les courants de court-circuit fournis par les panneaux solaires et multiplier par 1,30 (par mesure de sécurité). Exemple: si on a un panneau solaire qui fournit 4,8 A en court-circuit, il suffit de multiplier 4,8 A par 1,30, ce qui est égal à 6,24 A. Dans ce cas le régulateur doit être en mesure de supporter 6,24 A.

II-3 Système de stockage :

Le système de stockage est constitué de batterie. Les batteries les plus utilisées pour les systèmes photovoltaïques autonomes sont :

II-3-1 Batterie au plomb

Les batteries au plomb est constitué de deux électrodes une positives (PbO_2) et une négative (Pb). la figure II-3 explique le processus de charge et de décharge d'une batterie au plomb séparé par une solution acide.

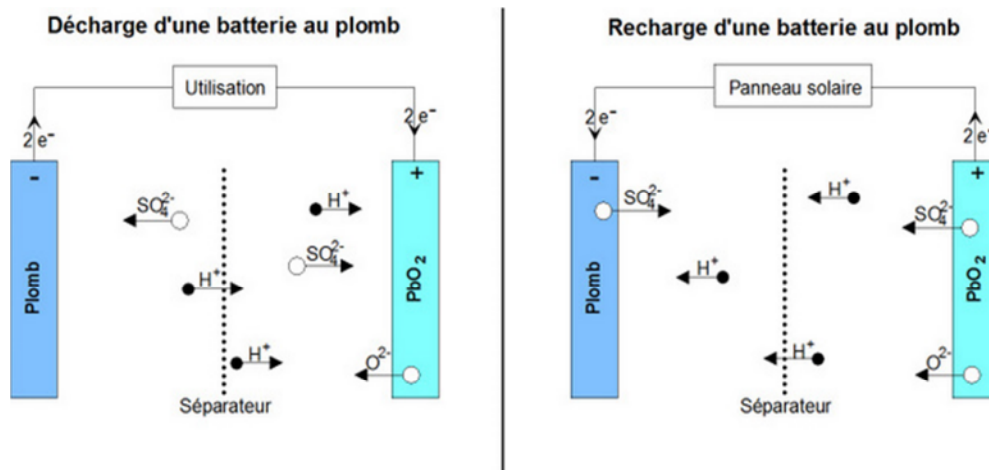


Figure II-3 : processus de charge et de décharge d'une batterie au plomb.[9]

A la décharge, les deux polarités se sulfatent, l'électrolyte est consommé (les ions SO_4^{2-} vont sur les électrodes). L'oxygène libéré par l'électrode positive s'unit aux ions H^+ en solution pour former de l'eau. Si la décharge est totale, l'électrolyte ne sera plus composé que d'eau distillée.

A la recharge, les deux polarités se désulfitent, l'électrolyte est régénéré (mise en solution d'ions SO_4^{2-}). La plaque positive est peroxydée (formation de PbO_2) et des ions sont libérés (augmentation de la concentration H^+ de l'électrolyte).

a- Décharge d'une batterie au plomb :

Relation entre la profondeur de décharge et la durée de vie des batteries

La profondeur de décharge est la quantité d'énergie qui a été déchargée de la batterie. Elle est donnée en pourcentage de sa capacité. Une profondeur de décharge de 80% indique une décharge profonde (la capacité d'une batterie est la quantité totale d'électricité qu'une batterie peut fournir après avoir été complètement chargée. Elle s'exprime en Ampère/Heure (Ah)). Une batterie ne doit pas subir de décharges profondes car sa durée de vie diminue rapidement avec la profondeur moyenne de décharge. En effet, quand une batterie est fortement déchargée, des phénomènes « nocifs » comme la sulfatation, le gel et la stratification de l'électrolyte se produisent plus rapidement que lorsque la profondeur de décharge est plus faible

b- Autodécharge

Une batterie se décharge lentement même si on ne s'en sert pas : c'est l'autodécharge. Le taux d'autodécharge dépend principalement du type d'alliage qui est utilisé pour les grilles : le taux de décharge est particulièrement élevé pour les alliages Pb-Sb où il atteint 5% par mois pour des batteries neuves à 25°C.

Le taux d'autodécharge augmente rapidement avec la température et quand la batterie vieillit : il peut atteindre 1% par jour pour une batterie Pb-Sb en fin de vie.

c- Charge d'une batterie Plomb

La vitesse de charge d'une batterie est rapide en début de charge puis se ralentit (courbe précédente).

Quand l'état de charge dépasse 80 à 90%, une régulation de tension et/ou d'intensité s'opère afin de limiter la vitesse de charge. En effet, l'excès d'énergie qui serait fourni à la batterie serait dissipé sous forme de chaleur.

D'une manière générale, une batterie ne doit pas être rechargée trop rapidement avec une intensité ou une tension trop forte. Généralement, l'intensité de charge ne doit pas dépasser 1/10 de la valeur du courant de décharge en 10 heures (C10). Fig II 3

d- Dégazage

Au cours de la charge, quand la batterie approche son état de charge maximale, des bulles d'hydrogènes et d'oxygène sont observées respectivement aux électrodes négatives et positives.

Ces gaz proviennent de l'électrolyse de l'eau contenue dans l'électrolyte.

Ce dégazage dépend de plusieurs paramètres :

- la tension maximale aux bornes de l'accumulateur, permise par la régulation. Les contrôleurs de charge doivent couper ou limiter le courant afin d'éviter un dégazage excessif.
- la température. Plus la température augmente, plus le dégazage se produit pour de faibles voltages.
- la vitesse de décharge. Les dégazages commencent pour des plus faibles états de charge quand la vitesse de charge augmente.

II-3-2 Les batteries au gel :

Ce nouveau type de batterie étanche utilise la technologie "Absorbed Glass Mat". L'électrolyte est imbibé dans de la fibre de verre et ne peut pas couler. Le transport et la manutention sont donc beaucoup plus aisés. N'ayant pas de liquide à l'intérieur, les batteries AGM sont aussi très peu sensibles aux effets dommageables du gel. Les plaques internes étant étroitement comprimées et solidement fixées, la résistance aux chocs et aux vibrations est nettement supérieure aux batteries conventionnelles. Elles bénéficient aussi d'un taux d'auto décharge très faible (entre 1% et 3% par mois) ce qui permet un entreposage de longue durée sans recharges fréquentes. La résistance interne des batteries AGM est très faible, il n'y a donc que très peu de dégagement de chaleur interne lorsqu'elles sont sollicitées, cela permet aussi une plus grande souplesse des taux de charge ou de décharge. Pour nos utilisations solaires, les batteries AGM sont idéales: pas d'entretien, pas de dégagement gazeux, utilisation des taux de charge conventionnels (permet d'utiliser n'importe quel système de charge standard).

a- Les avantages

Comparées à des batteries acides, les batteries gel présentent de très nombreux avantages :

- La durée de vie en cyclage des batteries gel est relativement élevée, il faut compter entre 500 et 1200 cycles selon les types de technologies. Comme la durée de vie est assez importante,
- le prix est rentabilisé sur la durée, de plus, il y a un gain sur la performance.

Chapitre II : Le système photovoltaïque autonome

- La haute technologie des batteries gel ont une technologie robuste, ainsi qu'une bonne résistance aux chocs et aux vibrations.
- Pas d'entretien Les batteries gel ne nécessitent pas d'entretien, ce qui est très avantageux puisqu'elles ne requièrent pas l'utilisation de produits spécifiques pour les entretenir. De plus, les batteries gel n'ont pas d'entretiens étanches, ce qui permet de les placer dans des endroits inaccessibles.
- Bonne résistance Les batteries gel présentent une bonne résistance cyclage profond, elles peuvent être déchargées complètement.
- Taux d'auto-décharge des batteries gel est relativement faible. En effet, il est compris entre 1 et 3% par mois.
- Faible dégagement L'utilisation de la batterie gel entraîne un faible dégagement d'hydrogène, donc pas de danger d'explosion ou de nuisance pour la santé. Moins de risques les batteries gel ne provoquent aucun écoulement, donc, s'il y a un risque d'accident, il n'y aura pas de fuite d'acide.
- les batteries gel ont une bonne tolérance aux températures élevées. Cycles répétitifs les batteries gel sont adaptées aux cycles répétitifs, pour une utilisation quotidienne.

b- Les inconvénients

Malgré les nombreux avantages cités ci-dessus, les batteries gel présentent quelques inconvénients qui sont énumérés ci-dessous. Le prix des batteries gel est relativement élevé. En effet, il faut compter 16600.00 DA pour une batterie gel de 100 AH. Perte d'électrolyte Les batteries gel sont closes, donc elles présentent des risques de perte d'électrolyte. Peu d'adaptation les batteries gel sont peu adaptées au courant de charge et de décharge élevés. Il s'avère donc que les batteries gel possèdent plus d'avantages que d'inconvénients, ceci leur vaut leur énorme succès.

II-4 Les onduleurs

Un onduleur est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue.

Ils sont utilisés en électrotechnique pour :

- a- Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables.

Exemple : C'est le cas des onduleurs servant à alimenter des moteurs à courant alternatif

devant tourner à vitesse variable par exemple (la vitesse est liée à la fréquence des courants qui traversent la machine).

- b- Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

Exemple : C'est le cas en particulier des alimentations de sécurité destinées à se substituer au réseau en cas de défaillance de celui-ci par exemple. L'énergie stockée dans les batteries de secours est restituée sous forme continue, l'onduleur est alors nécessaire pour recréer la forme de tension et fréquence du réseau.

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW).

a- Caractéristiques propres à un onduleur pour systèmes photovoltaïques (PV) :

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques sont quelques peu différents des onduleurs classiques utilisés en électrotechnique, mais l'objectif de conversion AC*/DC* est le même.

La principale caractéristique de l'onduleur PV est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système. En effet, le générateur PV (ensemble de modules PV) a une courbe caractéristique IV non linéaire. Pour un éclairement et une température donnés, la tension en circuit ouvert ou à forte charge est à peu près constante (assimilable à une source de tension), tandis qu'en court-circuit ou à faible charge le courant est

pratiquement constant (source de courant). Le générateur n'est alors ni vraiment une source de tension ni vraiment une source de courant non plus.

La tension de circuit ouvert est sensible à la température et diminue quand la température augmente. Le courant de court-circuit est quant à lui proportionnel à l'éclairement: augmente si l'éclairement augmente. La figure II-4 présente les caractéristique P(V) et I(V) d'un module photovoltaïque.

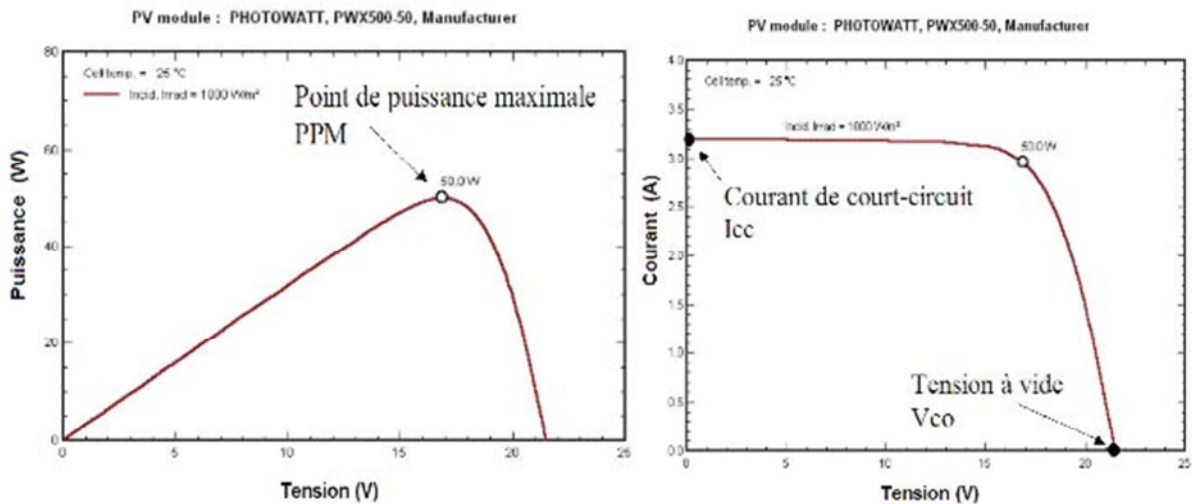


Figure II-4 : Courbe caractéristique P(V) et I(V) d'un module photovoltaïque. [10]

Le meilleur point de fonctionnement du système correspond au point de cette courbe où la puissance, produit de la tension et du courant, est maximisée. Il se situe au milieu de la caractéristique.

En régime permanent établi, la tension et le courant du capteur sont considérés comme constants. L'utilisation d'un onduleur de tension plutôt qu'un onduleur de courant est alors essentiellement motivée par des raisons technologiques.

L'onduleur de tension impose à sa sortie un système de tensions sous forme de créneaux modulés en largeur d'impulsions (MLI* ou PWM* en anglais). Ces créneaux ne posent aucun problème pour l'alimentation d'un moteur, mais sont incompatibles avec les tensions sinusoïdales du réseau.

On place alors entre chaque sortie de l'onduleur et chaque phase du réseau (onduleur monophasé ou triphasé) une inductance qui joue le rôle de filtre et permet à l'onduleur de fournir au réseau des courants quasi sinusoïdaux : d'un point de vue formel elle

transforme l'onduleur de tension en onduleur de courant. La figure II-5 présente le filtrage de la tension de sortie par l'impédance de sortie.

UDC correspond à la tension aux bornes du condensateur d'entrée d'un montage simple et UL1 à la tension injectée au réseau donc de fréquence 50 Hz

II-5 Le Câblage :

Le câblage du module et de la chaîne (string) est effectué au moyen de câbles solaires. Ils sont doublement isolés, résistants aux UV, flexibles (câble de cuivre généralement étamé) et résistent aux conditions atmosphériques extrêmes (- 40 °C à + 120 °C). Une grande section de câble est choisie afin d'éviter les pertes de puissance. Pour installations standard, on utilise une grande section : jusqu'à 4 A → 2.5 mm² jusqu'à 8 A → 4 mm²

On utilise des câbles de couleur pour un meilleur repérage :

Rouge pour le pôle positif,

Bleu pour le pôle négatif,

Noir pour les autres raccordements.

Un cordon unipolaire est utilisé pour le câblage du module et de la chaîne.

Les sections les plus utilisées : 2.5, 4 et 6 mm².

Un câble spécial bipolaire avec de bonnes caractéristiques mécaniques est tiré entre le coffret de raccordement et l'onduleur. Fréquemment ce câble possède un blindage de cuivre de 10 mm². Cette tresse de Cu est utilisée comme conducteur de compensation de potentiel. Sans blindage, il faut protéger le câble dans un tube métallique.

En site isolé, on produit de l'énergie sous forme de courants électriques continus basse tension (12, 24, 48V). Cette énergie étant relativement coûteuse au regard de l'investissement nécessaire pour la produire, il y a lieu de minimiser les pertes dans l'installation, de la production jusqu'à la consommation. Outre les pertes inévitables dues à l'électronique (régulation, et surtout conversion cc-ca) et au stockage (taux de restitution de l'énergie stockée, il est d'environ 0,9 pour une batterie neuve de bonne qualité, et diminue avec le temps et l'usure), le plus souvent des pertes d'énergies importantes sont dues à un mauvais câblage (notamment des sections de câbles insuffisantes), et/ou une qualité de connexions insuffisante.

Chapitre II : Le système photovoltaïque autonome

Une section insuffisante transforme les câbles en résistances; cela aura pour conséquences:

- chute de tension (perte de rendement des panneaux solaires);
- échauffement et oxydation des câbles; l'énergie gaspillée part en chaleur;
- consommation des appareils augmentée, avec performance diminuée;
- appareils perturbés: les régulateurs solaires sont trompés sur la réelle tension de la batterie;
- départ de feu.

D'une manière générale, les câbles recommandés sont en cuivre souple (multibrin), le cuivre présentant le meilleur rapport prix/conductivité, et la caractéristique multibrin permet d'assurer des connexions de qualité optimale, donc de minimiser les pertes d'énergie par chute de tension.

Les pertes de tension entre les panneaux solaires et les batteries doivent rester à un niveau inférieur à 5%, Il existe une relation mathématique entre :

- * La chute de tension, « dU », exprimée en %
- * La section de câble utilisée, « S », exprimée en mm²
- * La distance à parcourir, « D », exprimée en m
- * L'intensité circulant dans le câble, « I », exprimée en A
- * La tension du Régulateur, « U », exprimée en V :

$$S = (3,4 \times D \times I) / (dU \times U)$$

On peut donc facilement calculer la section de câble minimale devant être respectée entre le générateur et les batteries, pour une chute de tension donnée. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-joint. Il est facile de se rendre compte, à partir de la formule ou du tableau, que la même quantité d'énergie peut être transportée, sans augmentation des pertes, avec un câble de section inférieure, tout simplement en augmentant la tension. C'est ce qui explique que, pour des puissances d'installations élevées, on opte pour une tension de 24V, voire 48V. Le tableau 2 présente en standard les sections de câbles standards adaptés à presque tout les cas de figure

Chapitre II : Le système photovoltaïque autonome

Le tableau suivant donne la section recommandée de câble à utiliser entre les modules photovoltaïques et les batteries pour une tension de 12 V en continu.

Puissance Crête (W_c)	50	80	160	240	320	400	480	560	640
Intensité (A)	3	5	10	15	20	25	30	35	40
Distance (m)	Section des câbles cuivre souple en mm²								
4	4	4	4	4	4	6	10	10	10
5	4	4	4	4	6	10	10	10	16
6	4	4	4	6	10	10	16	16	16
7	4	4	4	6	10	10	16	16	16
8	4	4	6	10	10	16	16	16	25
9	4	4	6	10	16	16	16	25	25
10	4	4	6	10	16	16	25	25	25
15	4	6	10	16	25	25	25	35	35
20	4	6	16	25	25	35	35	50	50

Tableau II-2 : la section recommandée de câble à utiliser entre les modules pv et les batteries pour une tension de 12 V continue.

Chapitre II : Le système photovoltaïque autonome

Pour une tension de 24V en continu.

Puissance Crête (W _c)	100	160	320	480	640	800	900	1120	1280
Intensité (A)	3	5	10	15	20	25	30	35	40
Distance (m)	Section des câbles cuivre souple en mm ²								
4	4	4	4	4	4	4	4	4	6
5	4	4	4	4	4	4	6	6	6
6	4	4	4	4	4	6	6	6	10
7	4	4	4	4	4	6	6	10	10
8	4	4	4	4	6	6	10	10	10
9	4	4	4	4	6	10	10	10	16
10	4	4	4	6	6	10	10	10	16
15	4	4	6	6	10	16	16	16	25
20	4	4	6	10	10	16	25	25	25

Tableau II-3 :la section recommandée de câble a utilisé entre les modules pv et les batteries pour une tension de 24 V continue.

II-6 Les consommateurs :

Il existe deux types de consommateurs, des consommateurs en courant direct ou en courant continu mais dans la conception d'une installation, il est presque toujours plus avantageux de chercher des consommateurs fonctionnant en courant continu ou de les adapter plutôt que d'ajouter un onduleur et un consommateur en 230 V_{ac}. En général, les moteurs DC de quelques kW ont un rendement supérieur à ceux en AC et un onduleur perd toujours au minimum 10 % de son énergie en chaleur.

a- Les lampes :

Les lampes représentent les principaux consommateurs des systèmes autonomes. Le principal type utilisé est la lampe fluorescente qui présente le rendement le plus élevé. Les autres sources de lumière comme les lampes à incandescence et à halogène seront réservées aux courtes durées d'utilisation.

b- Radio – téléviseurs :

Le choix des radios et chaînes Hi-Fi est très grand en 12 V grâce aux autoradios. Le critère de choix principal, à qualité d'écoute égale, est la consommation continue la plus faible.

Pour les téléviseurs, le choix est plus limité : pour les appareils à alimentation directe DC, seuls quelques modèles de petits formats sont disponibles, la consommation des grands tubes restant importante.

c- Les pompes :

Le pompage de l'eau est une des priorités du solaire dans les régions isolées du sud. Pour les utilisations au nord, les besoins les plus courants sont la mise en pression de l'eau d'une habitation.

d- Les réfrigérateurs:

Les réfrigérateurs pour installations autonomes utilisent des compresseurs fonctionnant avec un moteur DC et une armoire à isolation renforcée. Leur prix est beaucoup plus élevé que les modèles standards en 230 V_{ac} (environ 2 à 3 fois plus cher) mais leur consommation est inférieure à la moitié pour les meilleurs modèles. Pour améliorer le rendement des réfrigérateurs ou congélateurs, il faut :

- les placer dans un endroit frais, à différence de température intérieure / extérieure la plus faible possible ;
- s'assurer que l'échangeur est bien ventilé pour qu'il puisse travailler efficacement ;
- ajouter des accumulateurs de froid (glaçons ou éléments fermés) pour que le compresseur travaille plus longtemps et moins souvent, son efficacité est ainsi augmentée ;
- les charger avec des aliments aussi froids que possible pour éviter de devoir les refroidir :

Il est fortement déconseillé d'utiliser un réfrigérateur en 230 V_{ac} alimenté par un onduleur : même si la puissance du compresseur est seulement de 50 à 100 W.

e- Les ventilateurs :

Pour la ventilation de petits espaces, on trouve des ventilateurs DC utilisés en électronique. Certains sont même déjà montés avec des cellules solaires dans une bouche de ventilation pour caravane ou bateau.

Pour les pays chauds, on trouve un ventilateur plafonnier en 24 V_{dc} qui a environ 40 % plus de rendement que son équivalent en 230 V_{ac}.

f- Ordinateur et imprimante :

La plupart des ordinateurs portables peuvent être connectés à une alimentation 12 V_{dc} ce qui résout le problème d'alimentation. Pour évaluer la consommation réelle, il est conseillé de mesurer l'appareil en tenant compte des cycles de charge / décharge de l'accumulateur intégré qui est le plus souvent au Ni-Cd.

Pour l'imprimante, les modèles les moins gourmands en énergie sont les modèles à jet d'encre (12 à 150 W) ; les modèles à impact consomment en général plus de 100 W et les types à laser de 300 à 1500W.

II-7 Les supports

a- Installation des structures sur toits plats :

Avec ce type de toiture il est nécessaire de poser des structures dont la stabilité est assurée par leur propre poids il n'est pas question de percer pour les fixer. Ces structures sont en général fixes mais adaptées à l'angle de captage optimum. Toute la structure peut être en béton, ou seulement le socle qui assure la stabilité par son poids et sur lequel vient se fixer une structure secondaire légère. Cette structure secondaire est composée de profilés rigides qui permettent d'adapter l'angle de captage au moment du montage. La plupart du temps les constructeurs utilisent des profilés en aluminium, mais quelques installations ont été montées avec des matériaux moins coûteux. De bons résultats ont été obtenus avec le bois dans une installation réalisée par l'Ecole Suisse d'Ingénieurs et de Techniciens du Bois (ESIB) à Bienne.

La préparation de la surface du toit avant la pose est importante pour éviter d'endommager l'un des films étanches ; le gravier et le sable doivent être enlevés et une plaque souple assurera une répartition uniforme de la pression sous les plaques de béton. Après la pose des structures, le sable et le gravier sont répartis de nouveau.

Pour faciliter le câblage et minimiser les effets d'ombrage, la surface de captage est généralement répartie en rangées parallèles est-ouest sur la largeur du terrain disponible.

Le câblage des rangées suivra naturellement les structures en caniveau jusqu'aux coffrets de raccordement.

Calcul des charges sur les supports :

Les forces engendrées par le poids de l'installation, la charge de neige et les effets du vent s'additionnent. La pression du vent exerce un effort perpendiculaire à la surface exposée.

Les effets de ces forces peuvent entraîner :

- une surcharge du toit.
- un arrachage des structures par dépression.
- un glissement ou une déformation.

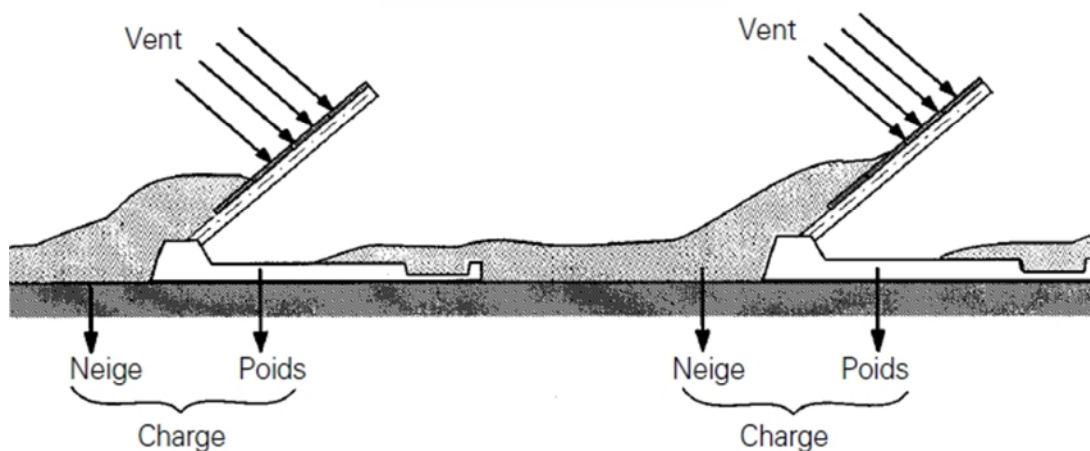


Figure II-5 : la charge du vent et de la neige sur la structure porteuse des panneaux [11]

Chapitre II : Le système photovoltaïque autonome

Le tableau suivant donne les valeurs de charge de neige pour le calcul selon la norme SIA 160 (Norme international des Actions sur les structures porteuses)

h (m)	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
P (kg/m²)	92	123	159	202	251	308	371	440	516
h (m)	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	/
P (kg/m²)	599	688	784	886	995	1111	1233	1362	/

Tableau II-4 : les valeurs de charge de neige pour le calcul selon la norme SIA 160

Le tableau suivant donne les valeurs de charge du vent pour le calcul selon la norme SIA 160.

h au-dessus du sol (m)	0-5	5-15	15-40	40-80	80-160	160-320
Pression du vent q (kg/m²)	70	85	100	120	150	180

Tableau II-5 : les valeurs de charge du vent pour le calcul selon la norme SIA 160.

La prise du vent par l'arrière des panneaux peut être diminuée par différentes mesures :

- augmentation du poids des structures (le lestage).
- montage d'un paravent.
- prolongation des pieds vers l'avant.

b- Installation sur toits inclinés :

Dans le cas d'immeubles existants, le générateur photovoltaïque sera posé parallèlement à la surface de tuiles au moyen d'une structure légère, laquelle sera ancrée directement sur la charpente du toit (figure II-7).

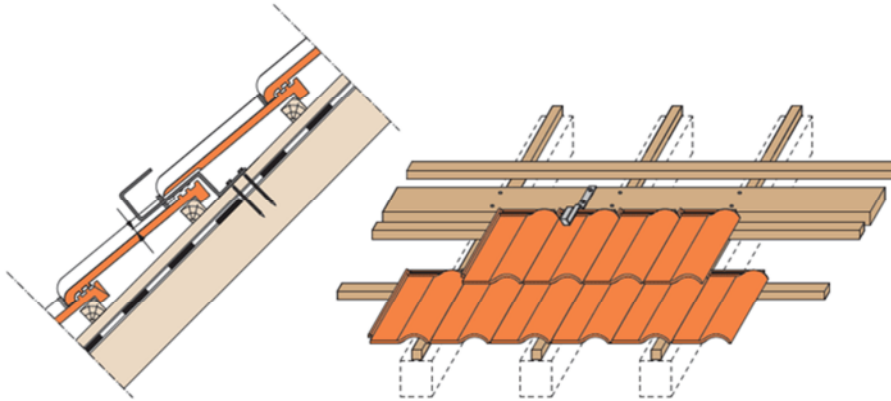


Figure II-6 : structure porteuse du panneau photovoltaïque sur la charpente du toit [12]

Les problèmes particuliers à ce type de montage sont :

- transmettre toutes les forces agissant sur les modules à la structure du toit.
- ne pas détruire l'étanchéité pendant le montage.
- éviter les accumulations d'eau à proximité des boîtiers de connexion ou des passages de câbles.
- assurer un bon refroidissement des modules par une distance adéquate.

II-8 Protection de l'installation photovoltaïque :

a- Protection contre la foudre :

Diode de protection

Installations auto régulées

Dans certains cas, les panneaux solaires photovoltaïques peuvent fonctionner sans régulateur de charge, utilisant simplement une diode anti-retour pour empêcher le courant de circuler dans le sens inverse sous les conditions suivantes:

- Le courant de charge des batteries est égal au courant produit par les panneaux solaires photovoltaïques; La température est relativement constante.
- Les batteries ont une capacité au moins 30 fois plus grande que le courant de court-circuit pouvant être délivré par les panneaux solaires photovoltaïques.

- La tension ouverte des modules est de l'ordre de 18 Volts maximum; Une diode anti-retour de capacité suffisante empêche le courant inverse de retourner vers le panneau solaire photovoltaïque.

Parafoudre

Un parafoudre est nécessaire pour protéger les installations des tensions transitoires élevées. Placé entre le fusible des panneaux et le régulateur, il sera relié à la terre afin d'évacuer la foudre potentiellement attirée par la structure métallique des modules (elle-même reliée à la terre). Lors de l'utilisation d'un réseau local ondulé, on utilisera également un parafoudre en tête de l'installation en alternatif.

b- Mise à la terre :

La mise à la terre assurera la protection des personnes et du matériel : la structure des modules, les parafoudres, l'onduleur sera raccordé à la terre.

Creusez un trou dans lequel vous déposerez du charbon. Plantez une tige en métal et refermez.

III- Méthode de dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome :

La réalisation des installations photovoltaïques exige une méthode de calcul et de dimensionnement de haute précision. L'installation sous dimensionnée reste une installation qui manque de fiabilité, tandis qu'une installation surdimensionnée va nous conduire à un coût plus élevé.

D'une façon générale, la maîtrise du dimensionnement global est basée sur les différentes caractéristiques techniques des sous-systèmes constituant l'installation photovoltaïque (le générateur PV, les batteries, les régulateurs et les convertisseurs,..).

Les différentes étapes pour le dimensionnement :

- l'estimation du besoin énergétique de l'installation (charge DC ou AC).
- calcul de l'angle d'inclinaison optimal pour le générateur photovoltaïque.
- la taille du générateur photovoltaïque (GPV) nécessaire.
- le mode de branchement des modules (séries/parallèles).
- le calcul de la capacité du champ de stockage d'énergie électrique (les batteries) et leurs modes de branchement (séries/parallèles).
- le dimensionnement du régulateur et de l'onduleur.
- le dimensionnement économique de l'installation

III-1 Evaluation de la consommation :

L'évaluation de la charge se fait par la détermination de la puissance ainsi que le temps d'utilisation journalière des différents appareils qui constituent l'installation.

L'énergie consommée en alternatif :

$$E_{AC} = \sum P_{(AC)} \cdot t \dots\dots(1)$$

L'énergie consommée en continue :

$$E_{DC} = \sum P_{(DC)} \cdot t \dots\dots(2)$$

L'énergie totale journalière consommée :

$$E_T = \frac{E_{DC}}{\eta_{bat}} + \frac{E_{AC}}{\eta_{bat} \cdot \eta_{ond}} \dots\dots(3)$$

E_T : Energie totale consommée par jour (Wh/J)

E_{AC} : Energie consommée en alternatif par jour (Wh/J)

E_{DC} : Energie consommée en continu par jour (Wh/J)

t : temps journalier d'utilisation (h)

$P_{(AC)}$: puissance consommé par les appareils qui fonctionnent en alternatif (W)

$P_{(DC)}$: puissance consommé par les appareils qui fonctionnent en continue (W)

η_{bat} : Rendement de la batterie

η_{ond} : Rendement de l'onduleur

III-2 Dimensionnement du générateur photovoltaïque :

On doit commencer par calculer le nombre total de module nécessaire pour alimenter la charge :

$$N_T = \frac{E_T}{\eta_M \cdot S_M \cdot G \cdot F_{CG}} \dots\dots(4)$$

Ou en fonction de la puissance crête de la charge et du module :

$$N_T = \frac{P_c}{P_{CM}} \dots\dots(5)$$

Le nombre de modules en série :

$$N_{MS} = \frac{V_{bat}}{V_{max}} \dots\dots(6)$$

Le nombre de modules en parallèle :

$$N_{MP} = \frac{N_T}{N_{MS}} \dots\dots(7)$$

Calcul de la puissance crête du générateur photovoltaïque :

$$P_C = \frac{1000.E_T}{G.F_{CG}} \dots\dots(8)$$

Avec :

$$P_C = 1000.S_M.\eta_S$$

Et :

$$E_T = G.S_M.F_{CG}$$

E_T : Energie totale consommée par jour (Wh/J)

F_{CG} : Facteur de correction globale (entre 0,65 et 0,9) la valeur souvent utilisée est 0,75.

G : irradiation globale sur un plan incliné (Wh/m²/J)

V_{bat} : Tension de la batterie, (V)

P_C : puissance crête nécessaire pour alimenter la charge (Wc)

P_{CM} : puissance crête du module photovoltaïque utilisé

S_M : Surface du module, (m²)

N_{MS} : Nombre des modules en série

N_{MP} : Nombre des modules en parallèle

η_m : Rendement du module

V_{bat} : Tension de la batterie, (V)

V_{max} : Tension au point de puissance max (V)

1000 : Irradiation durant les tests (Wh/m²)

III-2-1 Calcul de la taille de la surface photovoltaïque :

La surface du GPV est l'aire occupée par l'ensemble des modules photovoltaïques montés en série et en parallèle, pour satisfaire les besoins énergétiques de l'utilisateur.

$$\text{Surface} = N_{MP} \times N_{MS} \times S_M$$

S_M : Surface du module, (m²)

N_{MS} : Nombre des modules en série

N_{MP} : Nombre des modules en parallèle

La surface du générateur photovoltaïque s'exprime en fonction de la surface du module (S_M), du nombre des modules en série (N_{MS}) et le nombre des modules en parallèle (N_{MP}).

III-2-2 Choisir la tension de fonctionnement du champ photovoltaïque :

La tension de fonctionnement est choisie en fonction de la puissance crête du champ photovoltaïque :

- Pour moins de 500 W_c : elle est de 12V.
- De 501 à 2000 W_c : elle est de 24V.
- De 2001 à 10000 W_c : elle est de 48 V.

III-3 Dimensionnement du système de stockage :

La capacité de la batterie exprime la quantité d'énergie que peut restituer la batterie, pour dimensionner la capacité du parc de batterie, on a adopté la méthode suivante :

- calculer la consommation journalière moyenne (E_T).
- déterminer le nombre de jour d'autonomie (AUT) dont on souhaite bénéficier.
- déterminer la profondeur de décharge maximale acceptable par la batterie (D_M) d'après le type de batterie utilisée.
- calculer la capacité (C_{acc}) de la batterie, en appliquant la formule suivante :

$$C_{acc}(Wh) = \frac{E_T \cdot AUT}{\eta_{bat} \cdot D_M} \dots\dots(9)$$

Et :

$$C_{acc}(Ah) = \frac{C_{acc}(Wh)}{V_{bat}} \dots\dots(10)$$

Le nombre de batterie :

$$N_B = \frac{C_{acc}(Ah)}{C_b} \dots\dots(11)$$

Nombre de batterie en série :

$$N_{BS} = \frac{V_{insta}}{V_{bat}} \dots\dots(12)$$

Le nombre de batterie en parallèle :

$$N_{BP} = \frac{N_b}{N_{BS}} \dots\dots(13)$$

AUT : Jours d'autonomie, (J)

V_{bat} : Tension de la batterie, (V)

V_{insta} : Tension d'installation, (V)

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

η_b : Rendement de la batterie

N_B : Nombre total de batterie

N_{BS} : Nombre de batteries en série

D_m : Décharge profonde de la batterie

C_{bat} : Capacité batterie, (Ah)

N_{BP} : Nombre de batteries en parallèle

V_{bat} : Tension de la batterie, (V)

E_T : Energie totale consommée par jour (Wh/J)

III-4 Dimensionnement du régulateur :

Le dimensionnement du régulateur se fait d'après la tension, le courant d'entrée et de sortie.

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

$$I_S = 1,5 \frac{P}{V_{insta}} \dots\dots(14)$$

V_{insta} : Tension d'installation, (V)

I_S : le courant de sortie du régulateur (A)

P : puissance totale de la charge lorsque tous les appareils fonctionnent au maximum de leur puissance de fonctionnement (W)

III-5 Dimensionnement de l'onduleur :

Le dimensionnement d'un onduleur se base sur la somme des puissances maximales des équipements qui fonctionnent en alternatif, et se fait en fonction de :

- la Tension d'entrée : elle est égale à celle de la batterie ou du régulateur.
- la tension de sortie : en Algérie c'est du 220 V_{AC}, 50 Hz.
- la puissance nominale : puissance nominale de l'onduleur (VA), définie d'après les besoins exprimés, elle tient compte du nombre d'équipement, et de leurs puissances.

III-6 Calcul du coût de l'installation photovoltaïque :

Pour le calcul du coût d'une installation photovoltaïque on utilise le modèle suivant:

$$CT = C_{GPV} + C_B + C_{Reg} + C_{OND} + C_0 \dots\dots(15)$$

Chapitre III : Méthode de dimensionnement

Alors que le coût de revient en kW/h du système PV est donnée par :

$$C_{PVkWh} = \frac{C_{TDV}}{T_{Cons}} \dots\dots(16)$$

C_{TDV} représente le cout total estimé pour une durées de vie préavis donnée par :

$$C_{TDV} = CT + C_{OM} + C_{RB} \dots\dots(17)$$

C_{TDV} : Coût total estimé pour une durée de vie de l'installation prévue

C_{RB} : Coût de remplacement (Batteries)

C_{ons} : Consommation annuelle du système

C_{OM} : Coût d'opération et maintenance

C_{ond} : Coût de l'onduleur, si besoin

C_B : Coût du parc de stockage

C_0 : coût indirect (coût de la structure, du câblage... etc.)

C_{GPV} : Coût du générateur PV

C_{reg} : Coût du régulateur à installer

CT : Coût total initial du système

T_{Cons} : la durée de vie de l'installation

IV-1 Application pour le dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome

La partie pratique de notre travail consiste à dimensionner un système photovoltaïque autonome. Ce système contient des équipements disponibles au département d'électronique qui alimentent un ordinateur du bureau d'une puissance 160 W qui fonctionne six heures par jour avec une autonomie d'un jour :

- le module PV est en silicium polycristallin : $P = 285\text{W}$; $I_{\text{max}} = 7,95\text{A}$; $V_{\text{max}} = 35,81\text{V}$;
 $I_{\text{cc}} = 8,55\text{A}$; $V_{\text{co}} = 44,65\text{V}$
- l'onduleur a un rendement $\eta_{\text{ond}} < 98\%$
- la batterie au gel : η_{bat} de 96% à 98% ; $V_{\text{bat}} = 12\text{V}$; $C_{\text{b}} = 100\text{Ah}$; $D_{\text{M}} = 80\%$;

L'irradiation solaire globale sur un plan incliné à 46° à Tizi-Ouzou est de $3007,6\text{Wh/m}^2$.J au mois de février qui est le mois le plus défavorable de l'année (on prend $F_{\text{CG}} = 0,75$).

IV-1-1 Evaluation de la consommation :

L'énergie consommée en alternatif :

$$E_{AC} = \sum P_{(AC)} \cdot t = 160 \cdot 6 = 960\text{Wh}$$

L'énergie totale journalière consommée :

$$E_T = \frac{E_{DC}}{\eta_{\text{bat}}} + \frac{E_{AC}}{\eta_{\text{bat}} \cdot \eta_{\text{ond}}} = \frac{0}{0,97} + \frac{960}{0,97 \cdot 0,97} = 1020,3\text{Wh}$$

IV-1-2 Calcul de l'angle d'inclinaison optimale pour le générateur photovoltaïque :

L'angle d'inclinaison du générateur doit être calculé sur la base de la valeur de la latitude. Mais pour une utilisation annuelle constante, on doit régler notre angle d'inclinaison en fonction du mois le plus défavorable de l'année (Janvier – Février dans notre cas) en rajoutant 10° à la valeur de la latitude pour les endroits situés entre 30° et 40° de latitude (latitude de la ville de Tizi-ouzou : $36^\circ 45' 0''$). Notre générateur photovoltaïque sera incliné de 46° orienté plein sud.

IV-1-3 Dimensionnement du générateur photovoltaïque :

Le dimensionnement du générateur photovoltaïque se fait par les calculs de la puissance crête et du nombre total de module nécessaire pour alimenter la charge.

Calcul de la puissance crête du générateur photovoltaïque :

$$P_c = \frac{1000 \cdot E_T}{G \cdot F_{CG}} = \frac{1000 \cdot 1020,3}{3007,6 \cdot 0,75} = 452,3 W_c$$

Calcul de du nombre total de module nécessaire pour alimenter la charge :

$$N_T = \frac{P_c}{P_{CM}} = \frac{452,3}{285} = 1,58 \text{ (2 Modules)}$$

Le nombre de module en série :

$$N_{MS} = \frac{V_{bat}}{V_{max}} = \frac{12}{35,81} = 1 \text{ module}$$

Le nombre de module en parallèle :

$$N_{MP} = \frac{N_T}{N_{MS}} = \frac{2}{1} = 2 \text{ modules}$$

Donc notre champ photovoltaïque est composé de 2 modules branchés en parallèles.

IV-1-3-a Calcul de la surface du générateur photovoltaïque :

Calcul de la surface du GPV se fait en utilisant le nombre de modules en série (N_{MS}), le nombre de modules en parallèle (N_{MP}) et la surface du module (S_M)

$$\text{Surface} = N_{MP} \times N_{MS} \times S_M = 2 \times 1 \times 2 = 4 \text{ m}^2$$

IV-1-3-b Choisir la tension de fonctionnement du champ photovoltaïque :

La puissance crête nécessaire a l'installation est inférieure a $500W_c$ alors la tension de fonctionnement du champ photovoltaïque sera de 12 V.

IV-1-4 Dimensionnement du système de stockage :

Pour dimensionner le système de stockage, il faut :

- calculer la capacité (C_{acc}) de la batterie, en appliquant la formule suivante :

$$C_{acc}(Wh) = \frac{E_T \cdot AUT}{\eta_{bat} \cdot D_M} = \frac{1020,3 \cdot 1}{0,97 \cdot 0,8} = 1314,82 Wh$$

Et :

$$C_{acc}(Ah) = \frac{C_{acc}(Wh)}{V_{bat}} = \frac{1314,82}{12} = 109,57 Ah$$

Calculer le nombre de batteries :

$$N_B = \frac{C_{acc}(Ah)}{C_b} = \frac{109,57}{100} = 2 batteries$$

Calcul du nombre de batteries en série :

$$N_{BS} = \frac{V_{insta}}{V_{bat}} = \frac{12}{12} = 1 batterie$$

Calcul du nombre de batteries en parallèle :

$$N_{BP} = \frac{N_b}{N_{BS}} = 2 batterie$$

Notre système de stockage sera composé de 2 batteries en parallèles. (Liaison des batterie en série ou en parallèle est possible a partir de 2 batterie)

IV-1-5 Dimensionnement du régulateur :

- La tension nominale doit être celle du champ photovoltaïque, donc 12V
- Le courant d'entrée est le courant de charge maximal que les modules sont susceptibles de fournir. Mais par mesure de sécurité il est préférable de prendre 1,5 fois le courant maximal, donc $I_{Reg} = 7,95 \times 2 \times 1,5 = 23,85A$
- Le courant de sortie du régulateur doit être supérieur a la valeur maximale que peuvent consommer les appareils alimenté simultanément.

$$I_S = 1,5 \frac{P}{V_{insta}} = 1,5 \frac{160}{12} = 20A$$

IV-1-6 Dimensionnement de l'onduleur :

Pour le dimensionnement de l'onduleur on doit choisir la tension d'entrée qui est égale à celle de la batterie ou du régulateur, dans notre cas c'est 12V. Pour la tension de sortie on doit respecter les normes utilisées en Algérie c'est-à-dire 220V, 50 Hz.

IV-1-7 Dimensionnement économique de l'installation photovoltaïque :

Pour notre installation on a opté pour des équipements de la marque CONDOR disponible dans le marché algérien au prix suivant :

- Module photovoltaïque en silicium polycristallin 72 cellules de 285 W : $C_{GPV} = 30010,50$ DA
- Batterie au gel CGB 12V-100 Ah : $C_B = 16600,00$ DA
- Régulateur de charge solaires 12/24V-20A : $C_{Reg} = 8424,00$ DA
- Onduleur solaires 2 kW : $C_{OND} = 94770,00$ DA
- C_{OM} = coût de la maintenance

Pour le calcul du coût d'une installation photovoltaïque on utilise le modèle suivant:

$$CT = C_{GPV} + C_B + C_{Reg} + C_{OND} + C_{OM}$$

$$CT = [2 \times 30010,50] + [2 \times 16600,00] + [8424,00] + [94770,00] = 196415,00 \text{ DA}$$

Le prix de l'installation est de 196415,00 DA sans prendre en compte le coût du câblage car il dépend de l'endroit où est située notre installation par rapport à la charge.

C_{TDV} représente le coût total estimé pour une durée de vie de 20 ans sachant que les batteries ont une durée de vie de 10 ans et on suppose que l'opération de maintenance soit prise en charge par des étudiants ($C_{OM} = 0$ DA) :

$$C_{TDV} = CT + C_{OM} + C_{RB}$$

$$C_{TDV} = 196415,00 + [2 \times 16600,00] = 229615,00$$

Le coût de revient en KW/h du système PV est donné par :

$$C_{PVkWh} = \frac{C_{TDV}}{T_{Cons}}$$

$$C_{PVkWh} = \frac{229615,00}{24 \times 365 \times 20} = 1,31 \text{ DA}$$

IV-2 Application pour le dimensionnement d'un Kit photovoltaïque avec une autonomie de 3 jours

Dans cette partie de l'application on doit dimensionner un kit photovoltaïque (adaptable pour différentes charges) avec une autonomie d'un jour. Les équipements sont disponibles au département d'électronique (cité dans « Application pour le dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome »).

Calcul de la puissance crête du kit photovoltaïque :

$$P_c = 285 \cdot 2 = 570 \text{ Wc}$$

Calcul de l'énergie totale journalière pouvant être fournie par le kit photovoltaïque :

$$E_T = \frac{F_{CG} \cdot P_c \cdot G}{1000} = \frac{0,75 \cdot 3007,6 \cdot 570}{1000} = 1285,7 \text{ Wh}$$

Le nombre de module en série :

$$N_{MS} = \frac{V_{bat}}{V_{max}} = \frac{12}{35,81} = 1 \text{ module}$$

Le nombre de module en parallèle :

$$N_{MP} = \frac{N_T}{N_{MS}} = \frac{2}{1} = 2 \text{ modules}$$

IV-2-1-a Calcul de la surface du générateur photovoltaïque :

La surface nécessaire pour le champ photovoltaïque de notre kit en fonction du nombre de panneaux en série, en parallèle et la surface du module.

$$\text{Surface} = N_{MP} \times N_{MS} \times S_M = 2 \times 1 \times 2 = 4 \text{ m}^2$$

IV-2-1-b Dimensionnement de la structure porteuse des Modules photovoltaïques :

Dans notre travail on a opté pour une structure métallique sur toit plat avec lestage pour éviter tous percement sur le toit, les deux modules seront alignés cote à cote pour diminuer l'exposition au vent. Dans la figure IV-1 et la figure IV-2 on a une vue de face et une vue de côté de la structure.

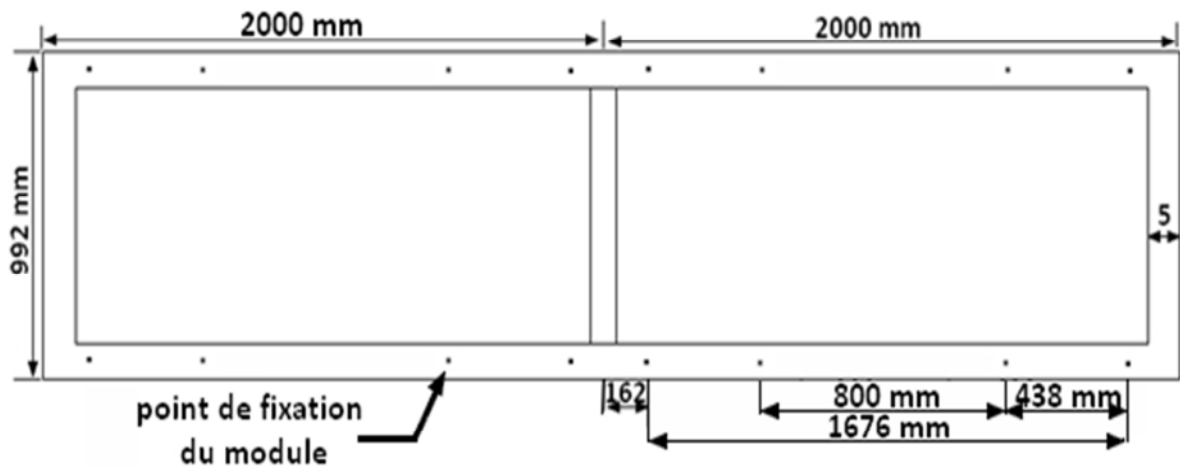


Figure IV-1 : vue de face sur la structure porteuse du kit photovoltaïque

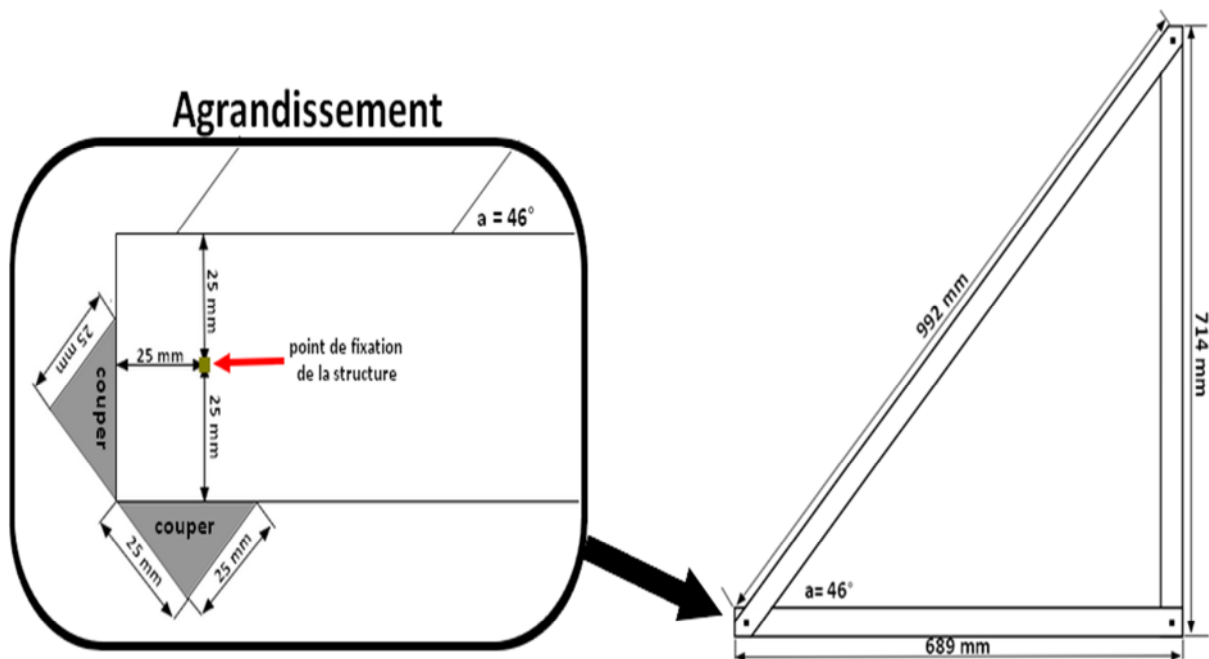


Figure IV-2 : vue de coté de la structure porteuse du kit photovoltaïque avec agrandissement sur le point de fixation de la structure.

IV-2-1-c Choisir la tension de fonctionnement du champ photovoltaïque :

La puissance crête du champ photovoltaïque est supérieur à $500W_C$ et inférieur à $2000 W_C$ alors la tension de fonctionnement sera de 24 V.

IV-2-2 Dimensionnement du système de stockage :

Le dimensionnement du système de stockage se fait en :

- calculant la capacité (C_{acc}) de la batterie, en appliquant la formule suivante :

$$C_{acc}(Wh) = \frac{E_T \cdot AUT}{\eta_{bat} \cdot D_M} = \frac{1285,7 \cdot 1}{0,97 \cdot 0,8} = 1656,8 Wh$$

Et :

$$C_{acc}(Ah) = \frac{C_{acc}(Wh)}{V_{bat}} = \frac{1656,8}{12} = 138,07 Ah$$

- Calculant le nombre de batterie :

$$N_B = \frac{C_{acc}(Ah)}{C_b} = \frac{138,07}{100} = 2 \text{ batteries}$$

Nombre de batterie en série :

$$N_{BS} = \frac{V_{insta}}{V_{bat}} = \frac{24}{12} = 2 \text{ batterie}$$

Le nombre de batterie en parallèle :

$$N_{BP} = \frac{N_b}{N_{BS}} = 1 \text{ batterie}$$

Notre système de stockage sera composé de 2 batteries en série. (Liaison des batteries en série ou en parallèle est possible à partir de 2 batteries).

IV-2-3 Dimensionnement du régulateur :

Le dimensionnement du régulateur doit se faire en :

- Calculant la tension nominale du régulateur est celle du champ photovoltaïque, donc 24V
- Le courant d'entrée est en fonction du courant de charge maximal que les modules sont susceptibles de fournir :

$$I_{\text{Reg}} = 7,95 \times 2 \times 1,5 = 23,85\text{A}$$

IV-2-4 Dimensionnement de l'onduleur :

Dans le cas d'un kit photovoltaïque on doit éviter d'utiliser des appareils qui fonctionnent en alternatif et dans la mesure du possible supprimer les onduleurs pour diminuer les pertes. Mais dans le cas où on doit l'utiliser on a :

- La Tension d'entrée est la même que la tension de la batterie ou du régulateur à savoir 24 V
- La tension de sortie est celle du réseau algérien donc : 220 V_{AC}, 50 Hz.

IV-2-5 Dimensionnement économique d'un kit photovoltaïque :

Pour notre kit on a utilisé les équipements CONDOR précédemment cités dans «Dimensionnement économique de l'installation photovoltaïque »

Pour le calcul du coût du kit photovoltaïque on utilise le modèle suivant:

$$CT = C_{\text{GPV}} + C_{\text{B}} + C_{\text{Reg}} + C_{\text{OND}} + C_0$$

$$CT = [2 \times 30010,50] + [2 \times 16600,00] + [8424,00] + [94770,00] = 196415,00 \text{ DA}$$

C_{TDV} représente le coût total estimé pour une durée de vie de 20 ans sachant que les batteries ont une durée de vie de 10 ans et en supposant l'opération et maintenance soit prise en charge par des étudiants (C_{OM} = 0 DA) :

$$C_{\text{TDV}} = CT + C_{\text{OM}} + C_{\text{RB}}$$

$$C_{\text{TDV}} = 196415,00 + [2 \times 16600,00] = 229615,00 \text{ DA}$$

Chapitre IV : Dimensionnement d'un kit photovoltaïque autonome

Le coût de revient en KW/h produit par le kit photovoltaïque est donnée par :

$$C_{PVkWh} = \frac{C_{TDV}}{T_{Cons}}$$

$$C_{PVkWh} = \frac{229615,00}{24 \times 365 \times 20} = 1,3 \text{ DA}$$

Le coût de revient du KW/h produit par le kit photovoltaïque sur 20 ans et de 1,3 DA sachant que le prix du kW/h proposé par SONELGAZ est 4,179 DA.

Conclusion :

L'objectif de notre étude est de proposer un kit photovoltaïque avec le meilleur rapport qualité prix et la plus longue durée de vie possible. En ce qui concerne les panneaux photovoltaïques nous avons opté pour des modules en silicium polycristallin adapté pour les températures moyennes de la région de Tizi-ouzou (19,2°C) avec des records à 46°C sachant que la température de fonctionnement de ce dernier est de -40°C à 85°C.

En ce qui concerne les batteries nous avons opté pour des batteries au gel, malgré leur cout élevé par rapport à la batterie Acide/plomb, elles disposent d'une durée de vie plus longue (10 ans) et un rendement plus élevé entre 96% et 98%.

On a commencé notre dimensionnement par choisir l'inclinaison optimale pour notre champ photovoltaïque en utilisant la méthode du moi le plus défavorable de l'année, dans notre cas c'est la période du mois de Février. Nous avons aussi calculé l'énergie produite par notre champ photovoltaïque durant cette même période en rajoutant une autonomie de 3 jours.

Sachant que le coté économie est très important dans notre étude nous avons aussi calculé le prix du KWh pendant la duré de vie du kit en fonction du coup totale de l'installation et de l'entretien. Le résultat trouvé est nettement inferieure au prix proposé par SONELGAZ (1,9 DA pour le KWh PV contre 4,179 DA Hors Taxe pour le KWh SONELGAZ).

Références bibliographiques

- [1] : D. Pellion. Modélisation, fabrication et évaluation des photodiodes à avalanche polarisées en mode Geiger pour la détection du photon unique dans les applications astrophysiques. Thèse de doctorat. Université de Toulouse 3. 2008
- [2] : H. BEN CHEIKH EL HOCINE. Simulation numérique de modèle de collecteur hybride photovoltaïque/photothermique. Thèse magister. Université de Constantine.2009
- [3] [4] : B. Flèche - D. Delagnes. Production d'énergie électrique : ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE. [Document électronique]. Juin 2007.
www.itismajo.it/fff/.../Energie_solaire_photovoltaique.pdf
- [5] : F. Trahi. Prédiction de l'irradiation solaire globale pour la région de Tizi-ouzou par les réseaux de neurones artificiels. Application pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation du laboratoire de recherche LAMPA. Mémoire de magister. Université de Tizi-Ouzou. 2011
- [6] : JM. Tarascon. Le photovoltaïque : principes et filières inorganique, organiques, hybrides. [Document électronique]. Université de Picardie. 2010-2011.
- [7] : Z. Bendjellouli. Contribution a la modélisation d'une cellule solaire. Mémoire de magister. Université de Bechar. 2009.
- [8] : Tout savoir sur le fonctionnement des régulateurs de charge. Energie Douce : le spécialiste des énergies renouvelables et des sites isolés. [En ligne].
<http://www.energiesdouce.com/content/22-conseils-faq-tout-savoir-sur-le-fonctionnement-des-regulateurs-de-charge>
- [9] : Batterie de stockage. Mémoire online. [En ligne].
http://www.memoireonline.com/05/12/5865/m_Etude-et-dimensionnement-dun-systeme-photovoltaque-autonome-pour-une-alimentation-permanente8.html
- [10] : V. Didier. Les Onduleurs pour systèmes photovoltaïques. Rapport de stage HESPUL. 2007.

[11] : Office fédéral des questions conjoncturelles. Centrales photovoltaïque. Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets. Coordination romande du programme d'action «Construction et énergie» EPFL-LESO. Lausanne. ISBN 3-905232-26-X. 1996. 252 pages.

[12] : Panneaux photovoltaïques : techniques de montage sur toiture inclinée. CSTC : Information et assistance. [en ligne].

<http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact34&art=519>