

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOULOD MAMMERI, TIZI-OUZOU



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

**Mémoire de fin d'études**  
Présenté en vue de l'obtention  
du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electronique

Option : COMMUNICATION- CONTROLE

*Thème :*

***DIMENSIONNEMENT ET INSTALLATION  
D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE  
(APPLICATION A LA F.G.E.I.)***

**Proposé par :**

**M<sup>r</sup> TIGHILT FERHAT O.**

**Dirigé par :**

**M<sup>r</sup>. ZERMI R.**

**Présenté par :**

**M<sup>elle</sup> HENNOUS Chahrazet**

**M<sup>elle</sup> AIT-ALLALA Kahina**

**Promotion 2008/2009**

# *Remerciements*

*Nous remercions DIEU qui nous a remplis de foi et de force pour finir ce projet.*

*Nous remercions notre promoteur **M. ZERMI R.** d'avoir dirigé ce travail en nous prodiguant conseils et encouragements, qu'il trouve ici notre reconnaissance pour sa patience et sa disponibilité.*

*Nous remercions notre co-promoteur **M. TIGHILT FERHAT O.** qui nous a proposé ce thème.*

*Nous tenons à remercier les membres du jury, qui ont accepté d'examiner et de corriger ce travail.*

*Nous remercions les enseignants du département d'électronique et tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'aboutissement de nos études.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

- *A mon brave père, et ma chère mère la lumière de mon chemin.*
- *A mon très chère mari qui n'a pas cessé de m'encourager durant le parcours de mes études.*
- *A la tendre Mani le symbole de la femme kabyle.*
- *A la mémoire de mes grands parents, et que dieu ait leurs âmes au paradis.*
- *A mes beaux parents ainsi que mes belles sœurs (Nacera, Nadia, Farida) et mon beau frère Marzouk.*
- *A mes adorables sœurs et frères (Sakina, Safia , Bahia, Brahim, Sid Ali) ainsi que mon petite frère Adel.*
- *A mes cousins et cousines Lyes, Hamid Ali, Assia kamilia, Thiziri, lyna*
- *A mes tantes et leurs maris ainsi que leurs enfants.*
- *A mes oncles et leurs femme ainsi leurs enfants.*
- *A toute ma famille.*
- *A mes fidèles amies: L.Kahina, L.Kahina, B.Lamia, djimi.karima.*
- *A ma très chère binôme **petite sirène** kahina.*

**Chahra**

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

- *A la mémoire de mon père , que Dieu ait son âme au paradis .*
- *A ma chère maman qui est ma source de tendresse et d'espérance.*
- *A mon guide d'enfance et de mon chemin de vie mon frère Djamel et sa femme Naima.*
- *ainsi que le petit ange Yanis.*
- *A ma chère mère qui est la promesse, et a celle que j'accomplis son rêve de vie ainsi*
- *qu' à son mari Ferhat.*
- *A mon adorable frère Elhadi et ma puce Sassi.*
- *A mes deux sœurs adorées Nadia et Malika ainsi que leurs mari M'hand et Rachid et leurs enfants Mezhoura ,said, Kenza, Djidji .*
- *A mon frère Hamid et sa femme ainsi que leurs enfants Krimou, Tahar,wahiba.*
- *A KIKI le chouchou de la famille ainsi que sa femme Aziza.*
- *A ma tante djedjiga et sa fille Doudou*
- *A mon très cher binôme poison vert.*
- *A toute ma famille.*
- *A mes fidèles amies Samia, Samira, Karima, Chahra.*
- *A mes amis Brahim,Mouhamed, Mustapha.*
- *A toutes mes copines de chambreN<sub>53</sub>.*
- *A mes copines Karima, Zohra, Sabiha, Souhila, KahinaL, KahinaG,Lamia Samia.*

***Kahina***

# Sommaire

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

## Chapitre I

### Procédés de conversion photovoltaïque

Introduction .....	03
I.1 Le rayonnement solaire.....	03
I.1.1 La trajectoire apparente du soleil.....	03
I.1.2 Le rayonnement hors atmosphère .....	04
I.1.3 Le rayonnement perçu au sol .....	04
I.2 L'effet photovoltaïque .....	06
I.3 Le système photovoltaïque .....	06
I.3.1 Production d'énergie .....	07
I.3.2 Contrôle de l'énergie.....	07
I.3.3 Utilisation de l'énergie.....	07
I.4 La conversion photovoltaïque.....	08
I.4.1 La cellule photovoltaïque (photopile).....	08
I.4.2 Caractéristique I(V) de la diode PN.....	09
I.4.3 Modélisation de la cellule photovoltaïque .....	09
I.4.4 Les caractéristiques d'une cellule solaire .....	10
a. Caractéristique courant-tension.....	10
b. La réponse spectrale .....	12
c. Le rendement énergétique .....	12
I.4.5 Les paramètres d'une cellule photovoltaïque .....	13
a. Les paramètres internes .....	13
b. Les paramètres externes .....	14
I.4.6 Les différents types de cellule solaire.....	16
I.5 Le passage de la cellule au module.....	18
I.5.1 Les caractéristiques des modules .....	18
I.5.2 Tests des caractéristiques des panneaux .....	19
I.5.3 Ensoleillement et inclinaison optimale .....	20
I.5.4 La protection des cellules et des modules.....	21

I.6 Le stockage d'énergie .....	22
I.6.1 Le rôle d'une batterie .....	23
I.6.2 Les caractéristiques d'une batterie.....	23
I.6.3 Types de batterie .....	25
I.7 Le régulateur .....	28
I.8 l'onduleur.....	28
I.8.1 Les caractéristiques d'un onduleur .....	28
I.8.2 Type d'onduleurs .....	29
Conclusion.....	30

## **Chapitre II**

### **Régulation des systèmes photovoltaïques**

Introduction.....	31
II.1 Les différents systèmes photovoltaïques .....	31
II.1.1 Les systèmes autonomes .....	31
a. Système au fil du soleil.....	31
b. Système avec stockage .....	31
II.1.2 Les systèmes autonomes hybrides.....	32
II.1.3 Les systèmes raccordés au réseau .....	32
II.2 Rôle des régulateurs de charge .....	32
II.3 Les stratégies de régulation des installations photovoltaïques .....	33
II.3.1 Les différents cas de fonctionnement .....	33
II.3.2 Fonctions d'un régulateur .....	35
II.3.3 Principe de fonctionnement d'un régulateur .....	36
II.3.4 Les caractéristiques du régulateur .....	36
II.3.5 Les techniques de régulation .....	37

II.3.2 Fonctions d'un régulateur .....	35
II.3.3 Principe de fonctionnement d'un régulateur .....	36
II.3.4 Les caractéristiques du régulateurs .....	36
II.3.5 Les techniques de régulation .....	37
II.3.5.1 La régulation de charge parallèle.....	37
II.3.5.2 La régulation de charge série .....	38
II.3.5.3 La régulation MPPT(Maximum Power Tracking) .....	38
II.3.5.4 Le régulateur de décharge par disjonction automatique .....	40
II.4 Optimisation du fonctionnement .....	40
II.4.1 Fonctionnement au point de puissance maximale .....	41
II.4.2 La technique moderne de régulation des systèmes photovoltaïques .....	43
Conclusion .....	44

### **Chapitre III : Dimensionnement des installations photovoltaïques**

Introduction .....	45
III.1 Dimensionnement des installations photovoltaïques .....	45
III.1.1 Les principales règles de dimensionnement .....	45
III.1.2 Les étapes de dimensionnement d'un système photovoltaïque .....	<b>46</b>
III.1.3 Méthodes simples de dimensionnement .....	<b>46</b>
III.1.3.1 La méthode simplifiée.....	47
a. Dimensionnement du champ photovoltaïque .....	<b>47</b>
b. Dimensionnement de la batterie stockage .....	47
c. Application pour la méthode .....	47
d. Estimation du coût .....	50
III.1.3.2 La méthode généralisée .....	50
a. Dimensionnement du champ photovoltaïque .....	50
b. Dimensionnement de la batterie de stockage .....	52
c. Application pour la méthode .....	53
d. Estimation du coût .....	54
III.1.3.3 Optimisation des calculs en agissant sur le stockage .....	55
Conclusion.....	56

## **Chapitre IV : Dimensionnement du système photovoltaïque pour la faculté Génie Electrique**

Introduction .....	57
IV.1 Définition du site .....	57
IV.2 Evaluation des besoins .....	57
IV.3 Caractéristiques du système .....	59
IV.4 Dimensionnement du générateur .....	59
IV.4.1 Caractéristiques du module AP100/1006 .....	59
IV.4.2 Calcul de la puissance crête du générateur photovoltaïque .....	59
IV.4.3 Calcul du nombre de modules et de panneaux.....	60
IV.4.4 Répartition des modules du générateur .....	60
IV.4.5 Caractéristiques du la générateur photovoltaïque .....	61
IV.4.6 Choix de l'orientation et l'inclinaison des modules photovoltaïques.....	61
IV.5 Dimensionnement de la batterie de stockage pour chaque champ.....	61
IV.5.1 Choix des batteries et leurs capacités.....	61
IV.5.2 Calcul de la capacité utile .....	62
IV.5.3 le nombre de batterie à utiliser.....	62
IV.5.4 Le nombre de branche parallèle et de batterie en série.....	62
IV.5.5 Calcul de l'énergie stockée dans les batteries.....	63
IV.6 Choix du régulateur .....	64
IV.7 Choix de l'onduleur .....	64
IV.8 Estimation du coût .....	65
IV.9 Etude comparative .....	65
IV.10 Choix de la diode de protection .....	66
IV.11 Câblage du système .....	66
IV.11.1 Propriétés des câbles à utiliser .....	66
IV.11.2 Montage et câblage des modules .....	67
IV.11.3 La protection électrique .....	67
Conclusion .....	68

**Conclusion générale .....**69

**Bibliographie**

**Annexes**

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I

<i>Figure I.1</i> : Les trois composantes du rayonnement incident sur le capteur .....	5
<i>Figure I.2</i> : Répartition spectrale du rayonnement solaire .....	5
<i>Figure I.3</i> : Le système photovoltaïque.....	6
<i>Figure I.4</i> : Structure de base d'une cellule photovoltaïque.....	8
<i>Figure I.5</i> : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque .....	10
<i>Figure I.6</i> : Caractéristique courant- tension d'une cellule photovoltaïque .....	11
<i>Figure I.7</i> : Influence de l'ensoleillement sur la courbe I-V d'un générateur.....	15
<i>Figure I.8</i> : Influence de la température sur la courbe I-V d'un générateur photovoltaïque. .	15
<i>Figure I.9</i> : Schéma d'une cellule polycristallin .....	16
<i>Figure I.10</i> : schéma d'une cellule à couche mince .....	16
<i>Figure I.11</i> : Comparaison d'une cellule au silicium monocristallin et amorphe .....	17
<i>Figure I.12</i> : Présentation d'une cellule, d'un module et du champ photovoltaïque .....	18
<i>Figure I.13</i> : Installation des panneaux solaires .....	21
<i>Figure I.14</i> : Protection des cellules contre la tension inverse.....	21
<i>Figure I.15</i> : Protection des modules par des diodes.....	22
<i>Figure I.16</i> : Caractéristique charge et décharge d'une batterie .....	24

## Chapitre II

<i>Figure II.1</i> : Schéma de principe pour le cas 1.....	33
<i>Figure II.2</i> : Schéma de principe pour le cas 2.....	33
<i>Figure II.3</i> : Schéma de principe pour le cas 3.....	34
<i>Figure II.4</i> : Schéma de principe pour le cas 4.....	34
<i>Figure II.5</i> : Schéma de principe pour le cas 5.....	35
<i>Figure II.6</i> : Schéma électrique d'un régulateur de charge shunt.....	38
<i>Figure II.7</i> : Schéma électrique d'un régulateur de charge série.....	39
<i>Figure II.8</i> : Schéma électrique d'un régulateur de type disjoncteur.....	40
<i>Figure II.9</i> : Schéma d'adaptation des modules sur batterie.....	41
<i>Figure II.10</i> : Intersection des caractéristiques du module et de la batterie.....	42

## Chapitre IV

<i>Figure VI.1</i> : Association des modules dans chaque champ.....	60
<i>Figure VI.2</i> : Association des champs de la centrale.....	60
<i>Figure VI.3</i> : Association des batteries (série- parallèle).....	63

# **LISTE DES TABLEAUX**

## **Chapitre I**

<i>Tableau I.1</i> : Absorption optique de quelques matériaux semi-conducteur.....	6
<i>Tableau I.2</i> : Rendement et coût des différentes technologies de module.....	17
<i>Tableau I.3</i> : L'inclinaison optimale.....	20
<i>Tableau I.4</i> : Caractéristiques de quelques onduleurs du photovoltaïque.....	29

## **Chapitre III**

<i>Tableau III.1</i> : Estimation du coût de la première installation.....	50
<i>Tableau III.2</i> : Estimation du coût de la deuxième installation.....	54

## **Chapitre IV**

<i>Tableau IV.1</i> : La puissance électrique total consommée par les néants.....	58
<i>Tableau IV.2</i> : La puissance électrique totale consommée par la charge.....	58
<i>Tableau IV.3</i> : l'énergie moyenne journalière requise par la charge.....	58
<i>Tableau IV.4</i> : Estimation du coût de la faculté génie électrique. ....	65
<i>Tableau IV.5</i> : Comparaison des coûts (photovoltaïques-sonalgaz) .....	65

## ***Introduction générale***

La grande partie de l'énergie consommée par l'homme provient des combustibles fossiles dont l'utilisation massive conduit à l'épuisement de ses réserves et suppose une menace réelle à l'environnement (réchauffement de la terre).

La prise de conscience des dangers de pollution, et le rapprochement de l'échéance d'épuisement de ces ressources ont largement stimulées la recherche d'autres types d'énergies de caractère renouvelable ( énergie solaire- énergie éolienne...) plus propres qui préserveraient le patrimoine naturel de la planète pour les générations futures.

L'énergie solaire photovoltaïque a des propriétés fondamentales qui permet à l'homme de la capter ; la stocker ; et la convertir en une autre forme plus appropriée à son utilisation.

Cependant la mise au point de l'électricité solaire nous offre la perspective d'un approvisionnement en énergie.

Pour cela il faut concevoir et réaliser des dispositifs de conversion adéquats capables d'alimenter nos charges à la fois industrielles et domestiques et qui assurent le stockage, ce qui impose de faire des efforts sur la maîtrise des technologies existantes et la recherche de nouvelles techniques qui permettront de disposer d'une source d'énergie fiable et inépuisable à un prix pouvant concurrencer les autres sources.

Les systèmes photovoltaïques nécessitent un dimensionnement pour toute application tenant compte de la localisation, du besoin et de l'autonomie de la batterie, et nécessitent aussi une régulation du fonctionnement de l'équipement, ce qui permet une bonne gestion de l'ensemble, surtout depuis que les systèmes de régulation pilotés à partir des microprocesseurs ou unité de commande, ont fait leur apparition dans tout les domaines ; l'intérêt de ces systèmes réside en leurs contribution à la production de qualité avec un coût réduit.

L'objectif de ce travail est de dimensionner un système photovoltaïque et de l'adapter à une application dans la faculté génie électrique et informatique.

Dans le premier chapitre des rappels sur le rayonnement solaire et la jonction PN sont développés, ensuite le procédés de conversion d'énergie solaire en une énergie électrique sera présenté et cela en définissant les éléments constituant la centrale et leurs caractéristiques.

Dans le second chapitre, nous avons présenté les méthodes de régulation de tension et de courant, de charge et de décharge des batteries utilisées pour stocker le surplus d'énergie et qui sera utilisé en cas d'un temps nuageux ou durant la nuit.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de deux méthodes de dimensionnement les plus utilisées pour certaines centrales photovoltaïques, et cela en dimensionnant les différents éléments constituant le système.

Le chapitre quatre consiste à dimensionner une installation photovoltaïque adaptée pour la faculté Génie électrique fonctionnant avec une assez grande puissance.

Enfin nous terminons par une conclusion générale.

**Introduction**

L'exploitation de l'énergie solaire au moyen de capteurs relève de deux technologies bien distinctes : l'une c'est l'énergie solaire thermique et l'autre c'est l'énergie solaire photovoltaïque qui produit de l'électricité

L'électrification par voie photovoltaïque nécessite un raccordement de dispositifs capables de convertir l'énergie solaire en énergie électrique exploitable a des fins d'alimentation.

Dans ce qui suit, une étude sur le procèdes de conversion solaire en électricité sera présentée, depuis la source primaire qui est le rayonnement solaire (sous forme d'ondes électromagnétiques) jusqu'à l'architecture de la centrale de production d'énergies électrique.

**I.1 Le rayonnement solaire**

Le soleil exerce sur notre planète une action vitale, véritable source de vie, bien qu'il soit le centre du système qui porte son nom (système solaire auquel la terre appartient). Sa lumière met 8mn et 18s à travers 150millions de kilomètres d'espace pour parvenir sur terre. La puissance émise par le soleil est estimée à  $1.7 \times 10^{23}$  kW dont une partie atteint le globe terrestre, elle est de l'ordre de  $8.5 \times 10^{13}$  kW ; uniquement 70% (environ  $6 \times 10^{13}$  kW) de cette puissance pénètre l'atmosphère.

Le soleil nous envoie de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde variant de  $0,22 \mu\text{m}$  à  $10 \mu\text{m}$ .

**I.1.1 La trajectoire apparente du soleil**

Pour un observateur situé sur la surface de la terre, le soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend de la *latitude* et la *longitude* du lieu où il se trouve, tel que :

- **La latitude:** est l'angle  $\theta$  que fait la verticale du lieu avec le plan équatorial :

Si  $\theta > 0$ , le site se trouve dans l'hémisphère nord

Si  $\theta < 0$ , il est dans l'hémisphère sud.

Si  $\theta = 0$ , le site se trouve à l'équateur.

- **La longitude :** est l'angle  $\varphi$  formé par deux plans méridiens passant par l'axe des pôles, l'un étant pris pour origine (méridien de Greenwich), et l'autre déterminé au lieu considéré .A tout écart de  $1^\circ$  de longitude correspond à un écart de 4mn de temps. La longitude  $\varphi$  est comprise entre  $-180^\circ$  et  $+180^\circ$ .

- **L'altitude :** correspond à la distance verticale  $d$ , exprimé en mètres, séparant le point considéré du relief terrestre du niveau de la mer, pris comme surface de référence.

### **I.1.2 Le rayonnement hors atmosphère**

On peut considérer, en première approximation que l'énergie du rayonnement hors atmosphère suit la loi du rayonnement du corps noir, en effet l'énergie augmente pour des longueurs d'ondes courtes. Ainsi plus le corps noir émet à une température élevée plus son rayonnement est énergétique, et la longueur d'onde du maximum énergétique diminue.

Le soleil a une température de surface estimée à 5760°K .Le flux énergétique qui provient de cet astre, intercepté dans l'angle solide représenté par la terre vaut :

$E_0 = W/m^2$ , il est connu sous la dénomination « constante solaire ».

### **I.1.3 Le rayonnement perçu au sol**

Cette énergie qui descend en ligne droite vers notre planète ne peut pas nous parvenir sur terre en intégralité car elle va subir des transformations en traversant l'atmosphère par absorption et par diffusion.

En effet, l'atmosphère contient, une majorité d'azote et d'oxygène (respectivement 78 et 21%), mais aussi l'argon, du CO<sub>2</sub>, de la vapeur d'eau, et la couche d'ozone, dont le rôle de filtrage des UV. Les poussières et les fumées provoquent également une variation spectrale, par contre les nuages (formés de minuscules gouttelettes d'eau) ont aussi leur importance dans la diffusion du rayonnement solaire.

#### ➤ **Le rayonnement direct**

Est une partie du rayonnement reçue directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ces rayons sont parallèles entre eux, cette composante directe du rayonnement peut être collectée par des systèmes optiques à concentration.

#### ➤ **Le rayonnement diffus**

Est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions, c'est-à-dire il est sans orientation particulière, il est donc impossible de le concentrer au moyen de lentilles optique.

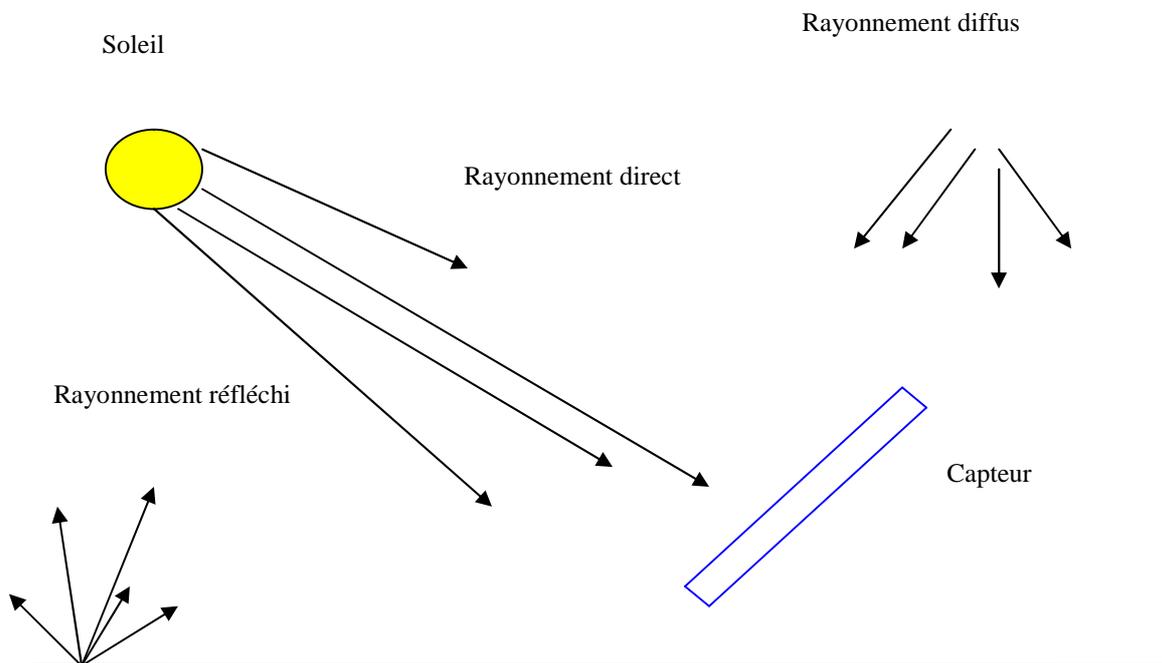
#### ➤ **Le rayonnement réfléchi (L'albédo)**

Est la partie réfléchi par le sol. Il dépend de l'environnement du site. La neige par exemple, renvoie énormément de rayons lumineux.

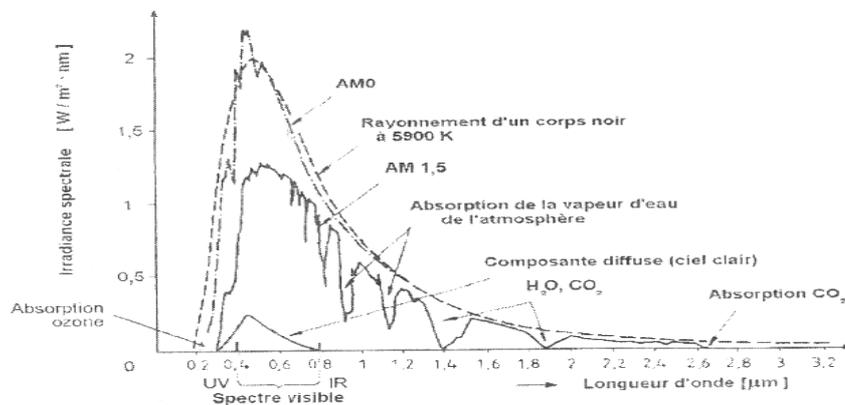
Ainsi le rayonnement qui arrive au sol possède au moins deux composantes : une composante diffuse et la composante directe .Le tout forme le **rayonnement global** qui est le rayonnement pris en compte pour la détermination du rendement des cellules solaires. Voir la figure I.1.

Le rayonnement global perçu au niveau du sol est donné en fonction de l'épaisseur atmosphérique effectivement traversée (Air Mass  $x$ , AM $x$ ) par rapport à l'épaisseur normalisée à 1 ( $x=1$ ) pour un soleil au zénith (Air Mass one, AM1).

- **Le nombre d'air-masse :** On appelle masse d'air ou Air Mass en anglais, le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu.
- **Le spectre solaire :** Le spectre du soleil est la distribution spatiale en fonction de la longueur d'onde ou de la fréquence du rayonnement électromagnétique émis par le soleil. La figure I.2 donne le spectre solaire au niveau de la terre et hors atmosphère.



**Figure I.1 : Les trois composantes du rayonnement incident sur le capteur.**



**Figure I.2 : répartition spectrale du rayonnement solaire.**

**I.2 L'effet photovoltaïque**

Il correspond à l'apparition d'une différence de potentiel entre les deux cotés d'une jonction semi-conductrice sous l'action d'une radiation lumineuse.

En plaçant en série différents semi-conducteurs sensibles à la lumière, il y a apparition d'une polarité dans ce dispositif, en effet pour une longueur d'onde suffisamment courte; un photon ayant une énergie supérieure ou égale au gap du semi conducteur, il pourra créer la paire électron-trou, une différence de potentiel apparaîtra aux bornes du semi-conducteur.

Les systèmes photovoltaïques, composés de nombreuses cellules élémentaires placées en série utilisent également l'effet photovoltaïque.

Le tableau I.1 représente l'absorption optique de quelques matériaux photovoltaïques à la longueur d'onde  $\lambda = 0,59\mu\text{m}$ , avec  $\alpha$  le coefficient d'absorption dépendant du matériau et de la longueur d'onde de l'énergie incidente, il s'exprime en  $\text{cm}^{-1}$

Matériau	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )
Silicium cristallin	$4,5 \times 10^3$
Silicium amorphe	$2,4 \times 10^4$
Arséniure de gallium	$5,4 \times 10^4$

Tableau I.1 : Absorption optique de quelques matériaux semi-conducteur [9].

**I.3 Le système photovoltaïque**

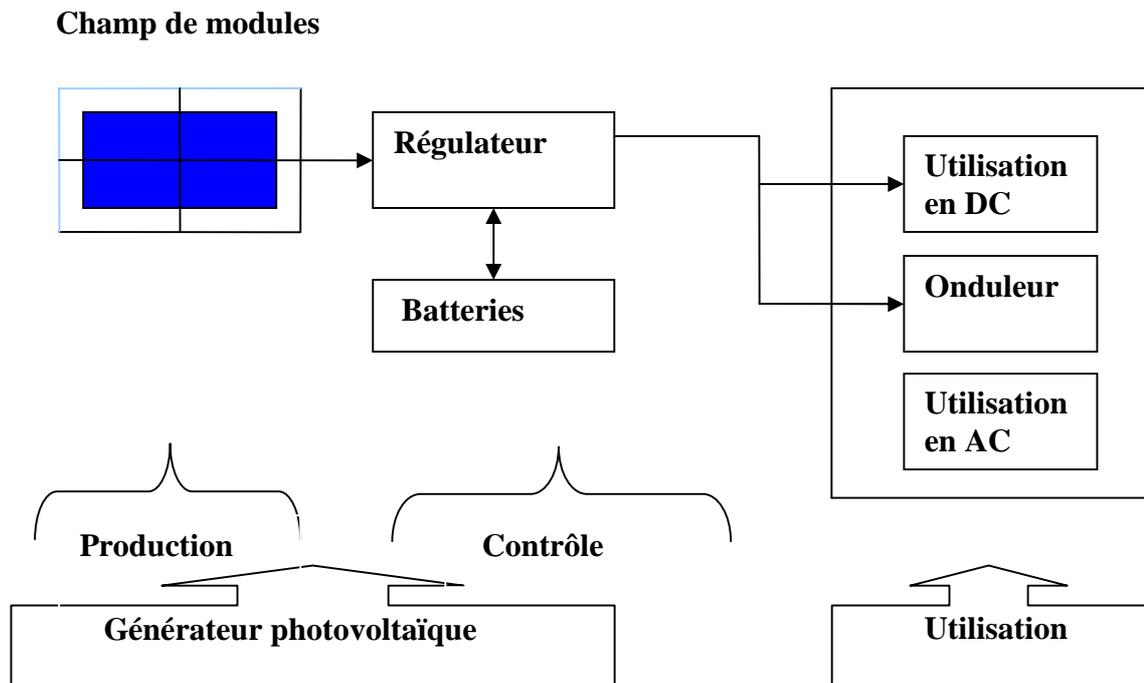


Figure I.3 : Le système photovoltaïque [8].

Tout système photovoltaïque peut se décomposer en trois parties : une partie production d'énergie, une partie contrôle de cette énergie et une partie utilisation de l'énergie produite.

L'analyse précise de chacune de ces fonctions doit être approfondie afin de construire un système fiable techniquement.

### **I.3.1. Production d'énergie**

Cette partie est essentiellement composée d'un ou plusieurs modules Photovoltaïques. Ces modules formés d'un assemblage des cellules photovoltaïques réalisent la conversion de l'énergie solaire en électricité. Un module photovoltaïque se comporte comme un générateur de courant continu (DC), lorsqu'il est branché sur une batterie de (12V), celle-ci lui imposera sa tension.

### **I.3.2 Contrôle de l'énergie**

L'énergie électrique que fournissent ces modules dépend entre autres, de l'ensoleillement et de leur position par rapport au soleil. D'où une irrégularité dans la production d'énergie qui peut ne pas être compatible avec les besoins énergétiques, généralement plus constants. Il est donc souvent nécessaire de contrôler l'approvisionnement en électricité à l'aide d'un système de stockage de l'énergie, avec ou sans régulation.

### **I.3.3 L'utilisation de l'énergie**

Cette partie se compose essentiellement d'un ou plusieurs récepteurs: se sont les différents matériels qui utilisent l'énergie électrique produite et contrôlée (éclairage, pompage). Il est aussi parfois nécessaire de modifier la nature du courant pour certaines applications (conversion du courant continu en courant alternatif au moyen d'un onduleur).

On appelle générateur photovoltaïque l'ensemble des deux premières parties, c'est-à-dire les modules couplés aux éléments de contrôle. On appelle système photovoltaïque l'assemblage d'un générateur photovoltaïque à un ou plusieurs récepteurs. Ce découpage en trois parties permet de bien identifier les différents composants des systèmes photovoltaïques et de bien comprendre la logique « production consommation » très particulière à l'utilisation du photovoltaïque.

## I.4 La conversion photovoltaïque :

### I.4.1 La cellule photovoltaïque (photopile):

La cellule photovoltaïque est un composant électronique à base de matériaux semi-conducteurs qui produisent des porteurs de charges (électrons-trous) en absorbant des photons. Le matériau est alors photoconducteur.

Pour réaliser une photopile, il est nécessaire de réaliser à la surface du semi-conducteur une jonction PN ou diode de surface, les photons incidents créent des paires électron-trou. Dans la zone de charge d'espace, les paires électron-trou créées par les photons sont dissociées par le champ électrique dirigé de la région n à la région p et une différence de potentiel apparait. La tension interne de la diode constitue la source de tension et les photoporteurs générés par le rayonnement solaire la source de courant. Ce courant photovoltaïque est dirigé de la région n à la région p, il est directement proportionnel à l'intensité de l'éclairement et il faut qu'il soit collecter en réalisant les contacts avant et arrière.

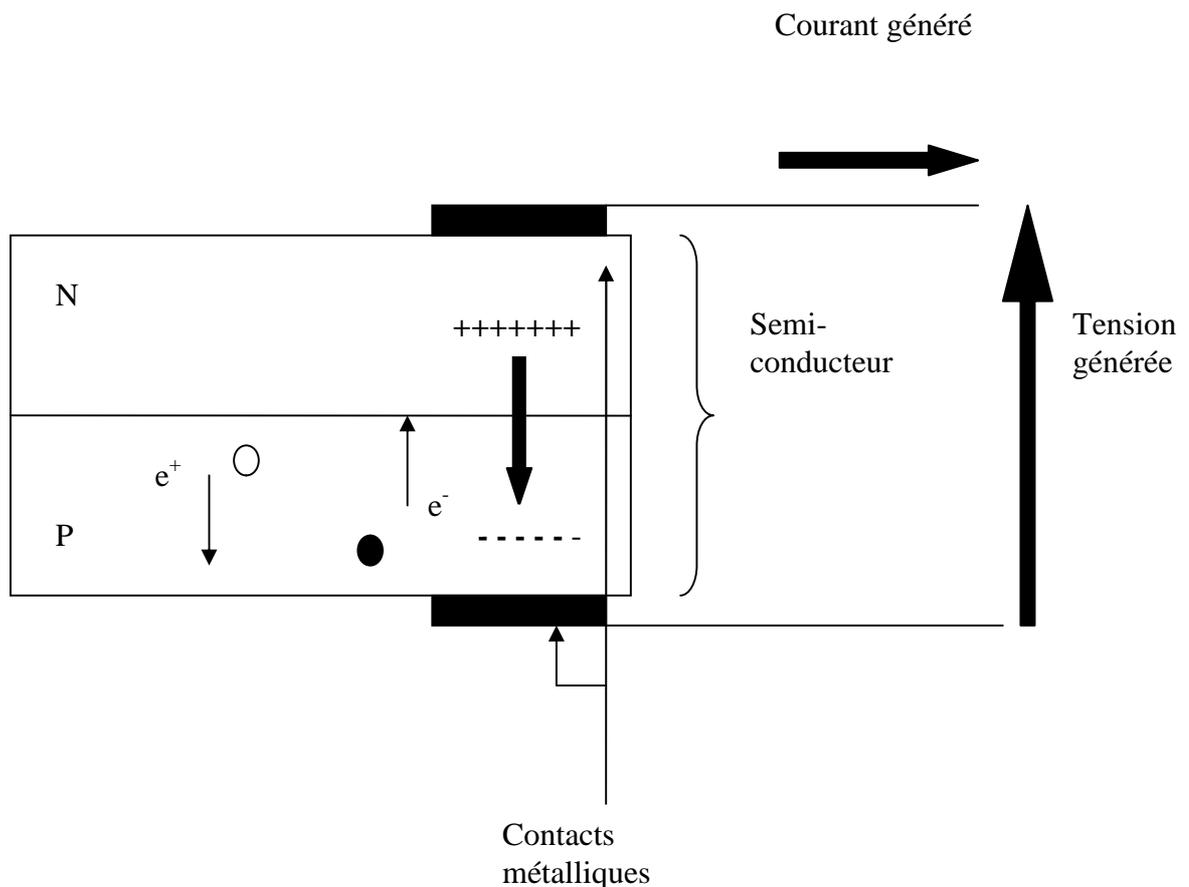


Figure I.4 : structure de base d'une cellule photovoltaïque [8].

**I.4.2 Caractéristique I(V) de la jonction PN [1]**

Les électrons mobiles dans le semi-conducteur peuvent provenir soit de la région n (Porteurs majoritaires), soit de la région p (porteurs minoritaires). On peut mettre en évidence le comportement de ces deux types de porteurs en appliquant une tension continue variable V aux bornes de la diode (à l’obscurité) et en fermant le circuit sur une résistance.

Si cette tension supplémentaire V est positive, la différence de potentiel entre les zones n et p est diminuée et les porteurs de charge majoritaires pourront plus facilement traverser la zone de charge d’espace donnant donc lieu à un courant  $I_d$  dirigé de la région p à la région n, intense car du aux majoritaires. Ce courant  $I_d$  augmente avec la température de la jonction et avec la tension appliquée V.

Si cette tension V est négative, la différence de potentiel entre les zones n et p est augmentée et seuls les porteurs de charge minoritaires pourront traverser la zone de charge d’espace donnant lieu à un courant  $I_s$  dirigé de la région n à la région p, faible car du aux minoritaires. Ce courant  $I_s$  augmente avec la température de la jonction.

A de trop fortes valeurs négatives de la tension appliquée V, la jonction claque par effet d’avalanche et elle est détruite. Ceci résulte en l’équation de la caractéristique à l’obscurité  $I_d(V)$  de la diode :

$$I_d = I_s [e^{V/V_T} - 1] \dots\dots\dots(1)$$

Où :

- $V_T = kT/q = 25\text{mv}$  à  $25\text{C}^\circ$  : est le potentiel thermodynamique  
( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ , constante de Boltzmann ; T, température absolue)
- $I_s$  : courant de saturation ;
- V : tension appliquée à la diode.

**I.4.3 Modélisation de la cellule photovoltaïque [3]**

Une cellule PV éclairée est schématisée par un générateur de courant, une diode, une résistance shunt et une résistance série.

Circuit idéal

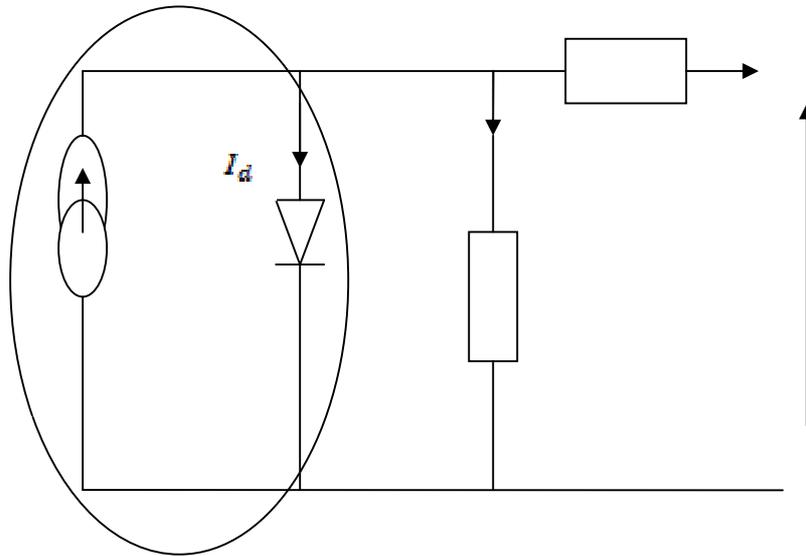


Figure I.5 schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque [8].

**I. 4.4 Les caractéristiques d'une cellule solaire**

**a. Caractéristique courant-tension**

Une cellule solaire reliée à une résistance électrique et qui est soumise à l'éclairement solaire débite un courant qui va se répartir entre la résistance et sa structure interne de la diode. Sa caractéristique I (V) correspond à la soustraction du photo-courant et du courant de la diode à l'obscurité.

$$I(V) = I_{ph} - I_d(V) = I_{ph} - I_s [e^{V/V_T} - 1] \dots\dots\dots(2)$$

Pour une température de jonction et un éclairement donnés, une cellule solaire n'impose ni la tension, ni le courant généré, seule la courbe I (V) est imposée, c'est-à-dire seule la relation liant le courant à la tension est fixée [1].

La caractéristique courant-tension, illustrée dans la figure I.6, décrit le comportement de la cellule photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques (niveau d'éclairement et température ambiante).

La courbe de la cellule solaire  $I = f(V)$  passe par trois points importants qui sont :

- Le courant de court-circuit :  $I_{cc}$
- La tension de circuit ouvert :  $V_{co}$
- La puissance maximale :  $P_m$ .

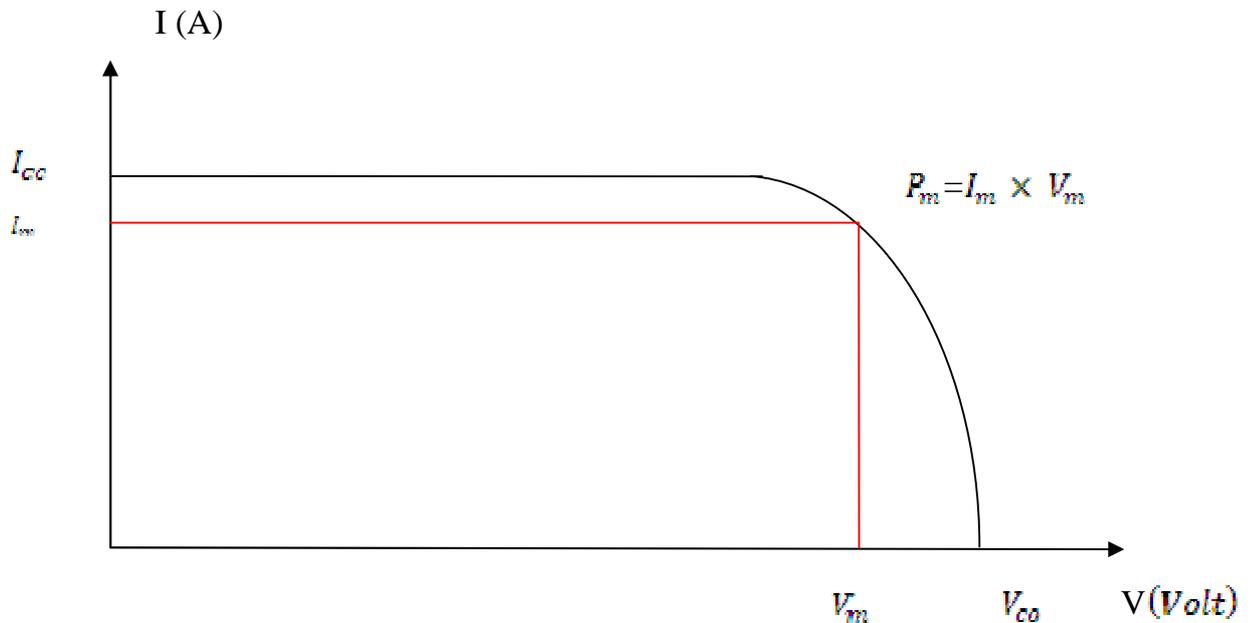


Figure I.6 : caractéristique courant-tension d’une cellule photovoltaïque

La figure I.6 montre bien que dans la partie verticale de la caractéristique, la cellule PV peut être considérée comme un générateur à tension constante et dans sa partie horizontale comme une source de courant.

• **courant de court circuit ( $I_{cc}$ )**

Le courant de court circuit  $I_{cc}$  ( $V_p = 0$ ) de la cellule photovoltaïque constitue le maximum de courant qui peut être obtenu d’une cellule, sa valeur typique sera à peu près d’une dizaine de milliampères (10-35) pour chaque centimètre carré de cellule. Il est exprimé comme suit :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[ e^{q(V+I R_s)/KT} - 1 \right] - (V + R_s I_s) / R_{sh} \quad [8] \dots\dots\dots (3)$$

Où :

$I_{ph}$  : Courant photo-généré par le générateur solaire sous éclaircment.

$I_s$  : Courant de saturation.

$R_s$ : résistance série du générateur solaire.

$R_{sh}$ : résistance shunt du générateur solaire.

Pour un niveau d'éclairement standard (égale à 1 kW/m<sup>2</sup>), lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, l'effet de la résistance série est négligeable (point I<sub>cc</sub> de la figure I.6). Dans ce cas, le courant de court-circuit peut être considéré comme étant équivalent au photo-courant I<sub>ph</sub>, c'est à dire proportionnel à l'éclairement □:

$$I_{cc} = I_{ph} = C \square$$

C: constante

- **Tension de circuit ouvert**

Lorsque I<sub>p</sub> =0 (point V<sub>co</sub> de la figure I.7), la tension du circuit ouvert est la tension pour laquelle le courant aux bornes de la cellule est nul ; elle constitue la tension maximum qui peut être obtenue d'une cellule ; elle se situe autour de 0,6V pour le cas d'une cellule au silicium. Elle est exprimée analytiquement selon la formule suivante:

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln[1 + (I_{ph}/I_s)] \quad [8] \dots \dots \dots (4)$$

La tension de circuit ouvert V<sub>co</sub> correspond à la chute de tension aux bornes de la jonction PN, lorsqu' elle est traversée par le photo-courant I<sub>ph</sub>.

- **Puissance maximal**

La partie intéressante dans la caractéristique I-V d'une cellule est celle qui génère de l'énergie. La puissance de sortie de la cellule (ou du générateur) est le produit du courant de sortie délivré par cette dernière et la tension à ses bornes.

La valeur de la puissance au point de court-circuit est nulle étant donné que la tension est nulle. La puissance au point de circuit ouvert est nulle également. La puissance entre ces deux points est positive et le point de puissance maximum (PPM) de coordonnées obtenues pour  $V = V_m$  et  $I = I_m$  telle que:  $P_m = V_m \times I_m$ .

**b. La réponse spectrale**

Une cellule photovoltaïque n'utilise pas indifféremment toutes les longueurs d'onde du spectre solaire. On appelle réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque l'efficacité avec laquelle elle transforme l'énergie d'un rayonnement d'une certaine longueur d'onde en énergie électrique. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau constituant la cellule.

**c. Le rendement énergétique (efficacité) :**

Il est définit quant à lui le rapport entre la puissance électrique optimale obtenue aux bornes de la cellule et la puissance du rayonnement incident. Il est donné en fonction des grandeurs mesurables.

S : est la surface de ce module ;

E : l'éclairement en W/m<sup>2</sup>.

Le rendement s'écrit alors :

$$\square = P_m / E \times S = FF \times I_{cc} \times V_{co} / P_{inc} \dots\dots\dots(5)$$

Avec :

$P_{inc}$  : Puissance incidente.

$$FF = P_m / (V_{co} \times I_{cc}).$$

On prend une cellule a une densité de courant  $I_{cc}=33 \text{ mA/cm}^2$ , une tension  $V_{co}$  de 0,56V et  $FF=0,81$ , son rendement de conversion  $\eta$  est de 15%.

**I.4.5 Les paramètres d'une cellule photovoltaïque**

Cinq paramètres influent sur le comportement électrique d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque. Ces paramètres sont :

- La résistance série  $R_s$
- La résistance shunt  $R_{sh}$
- Le courant de saturation  $I_s$
- Le flux d'éclairement
- La température T.

Pour un flux égale à  $1\text{Kw/m}^2$ , ces paramètres peuvent êtres considérés comme indépendants, excepté le courant de saturation  $I_s$  qui dépend directement de la température T de la cellule.

**a. Les paramètres internes**

• **Influence de la résistance série**

D'une valeur généralement très faible, la résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la cellule se comporte comme un générateur de tension. Elle ne modifie pas la tension de circuit ouvert. Lorsqu'elle est anormalement élevée, elle peut diminuer notablement la valeur du courant de court circuit. Sa valeur est fonction des résistances de contacts métalliques et de la résistance de la grille collectrice.

• **Influence de la résistance shunt**

Il s'agit le plus souvent d'une conductance de fuite. C'est comme si l'on devait soustraire au photo-courant, outre le courant de la diode, un courant supplémentaire proportionnel à la tension développée. La résistance shunt est en général très élevée. Si elle diminue on

remarque une légère pente au voisinage du point de courant de court-circuit sur la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque.

Une résistance shunt trop faible aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la cellule : en effet, une cellule photovoltaïque dont la résistance shunt est trop faible ne donnera plus de tension sous un faible éclairement.

### **b- paramètres externes**

- **Influence de l'éclairement**

Nous avons vu que le courant produit par la photopile  $I_{ph}$  est pratiquement proportionnel au flux lumineux. Une baisse de l'ensoleillement provoque une diminution de la création de paires électron-trou avec un courant à l'obscurité inchangée. Le courant du générateur étant égal à la soustraction du photo-courant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une baisse du courant solaire  $I_{cc}$  proportionnelle à la variation de l'ensoleillement accompagnée d'une très légère diminution de la tension  $V_{co}$  (figure I.8). Ceci implique donc que:

- La puissance optimale de la cellule ( $P_m$ ) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.

- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

- **Influence de la température**

Une élévation de la température (de jonction) des cellules solaires provoque un important accroissement de leur courant à l'obscurité mais facilite plus la création de paires électron-trou. Le courant du générateur étant égal à la différence des deux courants, il y a une légère augmentation du courant  $I_{cc}$  accompagnée d'une forte diminution de la tension  $V_{co}$  en raison d'une augmentation du courant direct de la diode et donc un décalage du point  $P_m$  vers les puissances inférieures. (Figure I.9).

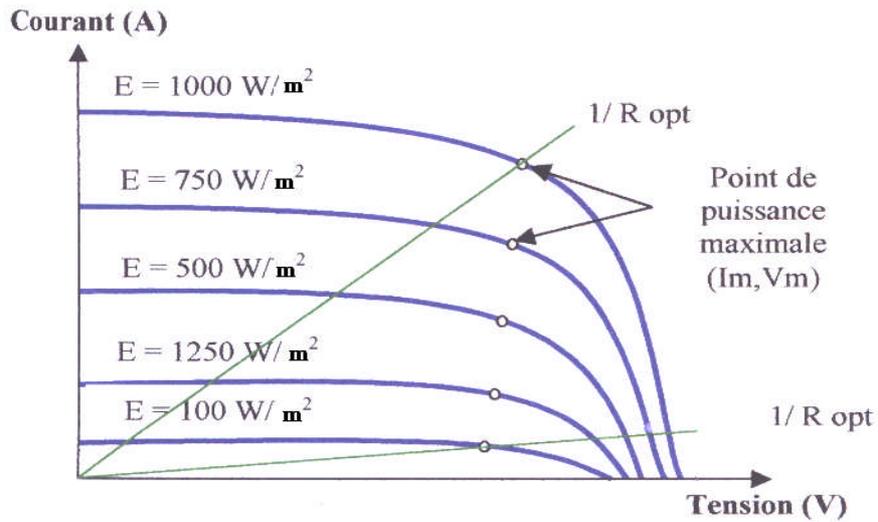


Figure I.7 : Influence de l'ensoleillement sur la courbe I-V d'un générateur photovoltaïque [3]

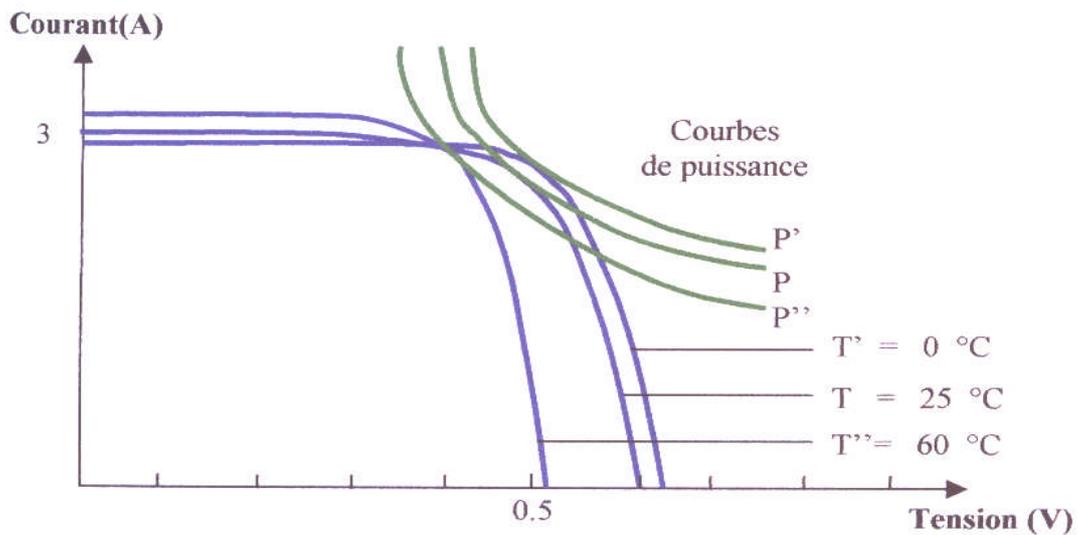


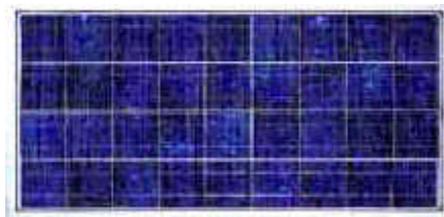
Figure I.8 : l'influence de la température sur la courbe I-V d'un générateur photovoltaïque [3]

### I.4.6 Les différents types de cellules photovoltaïques

La réalisation de cellules à base de silicium reste la filière la plus avancée sur le plan technologique et industriel, en effet, le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice, parfaitement stable et non toxique. Il existe trois grands types de silicium : monocristallin, amorphe et polycristallin. Les siliciums mono ou poly cristallin ont un rendement électrique et une durée de vie deux fois supérieure à celle du silicium amorphe, mais sont nettement plus coûteux. Dans la pratique, l'amorphe est choisi pour les applications de très faible puissance comme par exemple les calculatrices ou les montres alors que toutes les autres applications d'envergure supérieure privilégient le silicium cristallin.

- **La technologie monocristalline** : plus chère, utilise des barres pure de silicium également employées dans la fabrication des puces électroniques .Le silicium monocristallin est une matière première d'une très grande pureté. Le rendement de cette cellule est de 12 à 16%. [2 ,10]

- **Le silicium polycristallin** : il est obtenu par refonte des chutes du silicium monocristallin, sa fabrication est plus maitrisé sur le plan industriel donc, son coût de production est moyen. Le rendement de cette cellule est entre 11 et 14% [2,10] .



*Figure I.9 : Schéma d'une cellule polycristallin*

- **La technologie couche mince** : qui désigne un type de cellule (ou module) obtenue par diffusion d'une couche mince de silicium amorphe sur un substrat (verre). Cette cellule a un rendement qui varie entre 6 et 8 % [2,10].



*Figure I.10 : Schéma d'une cellule en couche mince*

➤ Le cout obtenu pour différents technologies de modules (au silicium) ayant une certaine surface sont donnés dans le tableau I.2 :

Type de module (silicium)	Surface unitaire $S_0$ (m <sup>2</sup> )	Surface Active $S$ (m <sup>2</sup> )	Rendement %	Cout d'un module €
Amorphe	0,291	1060	5	122.00
Monocristallin	0,615	121	15	733.00
Multicristallin	0,636	151,3	12	529.00

Tableau I.2: Rendement et coût des différentes technologies de module [2].

A partir des résultats, on va opter pour le module multicristallin car il présente le meilleur rapport qualité/prix

La figure (I.11) montre les performances comparées d'une cellule au silicium monocristallin et d'une cellule au silicium amorphe sous éclairement maximal.

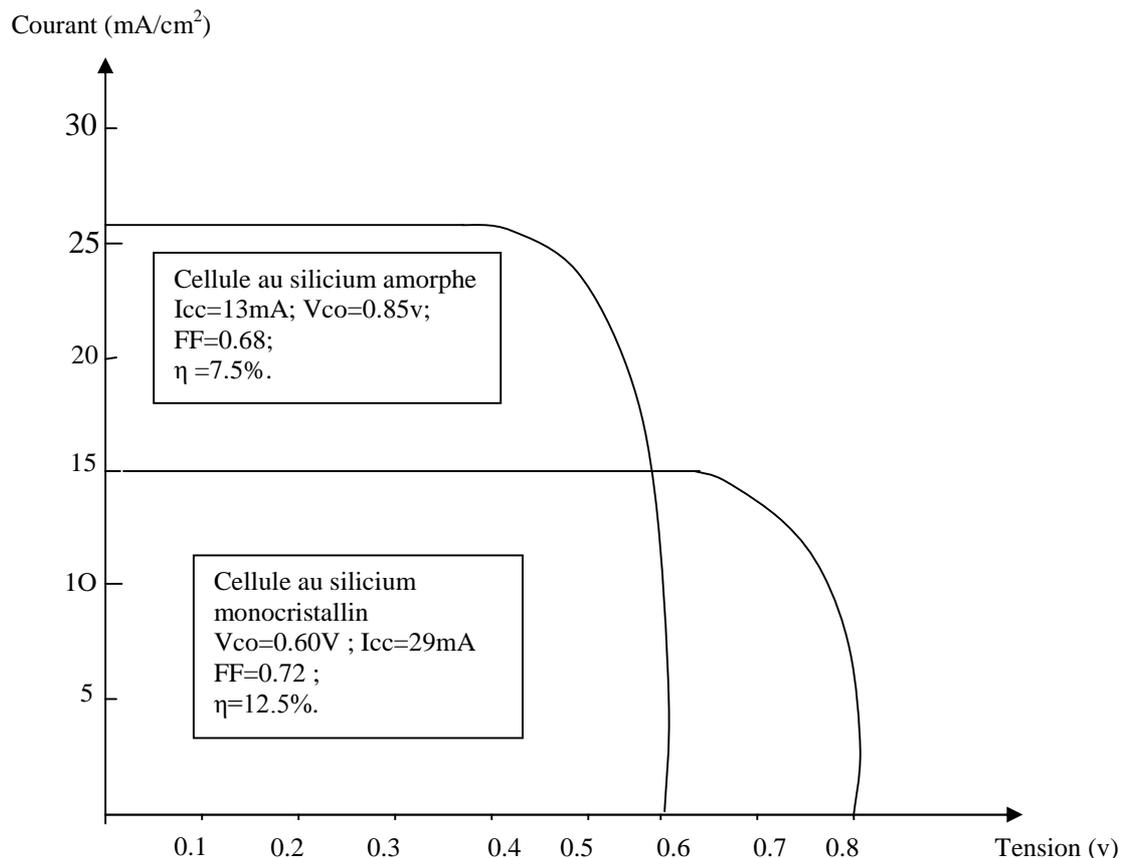
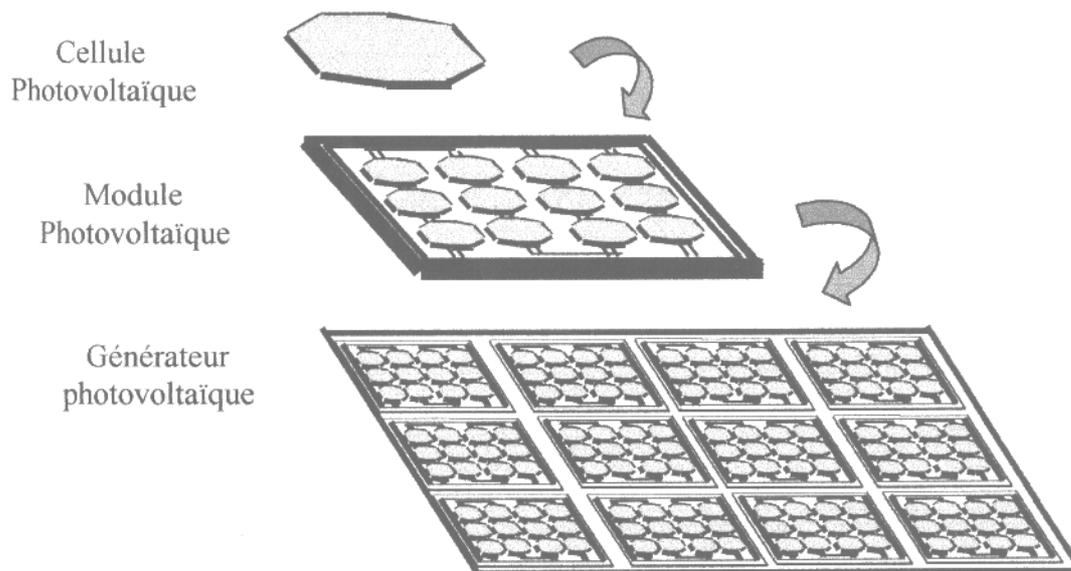


Figure I.11 : comparaison d'une cellule au silicium monocristallin et amorphe [9].

### I.5 Le passage de la cellule au module

La cellule individuelle, unité de base d'un système PV ne produit qu'une très faible puissance en regard des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. En effet, une cellule élémentaire délivre une puissance électrique de 1 à 3Watt avec une tension de moins d'un volt. Pour élever cette puissance produite, les cellules sont assemblées pour former un module. Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension.

L'interconnexion de modules entre eux pour obtenir une puissance encore plus grande et donc de disposer d'une installation qui fournira une puissance de plusieurs centaines watt, de kilo-watt, voir de mégawatt, définit la notion de champ photovoltaïque.



*Figure I.12 : présentation d'une cellule, d'un module et d'un champ photovoltaïque [3].*

#### I.5.1 Les caractéristiques des modules

Le panneau solaire photovoltaïque étant une association de cellules solaires, sa caractéristique  $I(V)$  est directement liée à celle de la cellule de base, il est caractérisé par la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  et le courant de court-circuit  $I_{cc}$ .

L'énergie fournit par un module dépendra donc :

- Du type de cellule photovoltaïque retenu.
- Du nombre de cellule montée en série sur ce panneau.

Le nombre d'électrons libérés par une cellule, pour une unité de temps donnée, dépend du flux de photons arrivant sur celle-ci, alors que le courant de sortie d'un panneau solaire dépendra donc :

- De l'ensoleillement ;
- De l'orientation du module par rapport au soleil (un panneau perpendiculaire aux rayons du soleil reçoit le plus grand flux de photons) ;
- Du nombre de circuits de cellules montées en parallèle.

La tension aux bornes d'un module, ainsi que la puissance électrique qu'il fournit est donc déterminée fortement par le choix du constructeur (nombre de cellules en série et dimension des panneaux).

La puissance maximale est obtenue en un point qui dépend de la température est de l'intensité de l'éclairement, elle est exprimée en watt crête ( $W_c$ ) et elle sert à déterminer le rendement nominal du panneau.

Le rendement du module est le rendement d'une cellule diminué par les pertes dues aux connexions des cellules entre elles, à la transparence des matériaux d'encapsulation et éventuellement à la chute de tension dans la diode « anti-retour » lorsqu'il faut protéger la batterie d'une éventuelle décharge nocturne.

$$\eta_{\text{module}} = \eta_{\text{cellule}} \times \eta_{\text{connexion}} \times \eta_{\text{encapsulation}} \times \eta_{\text{diode}} \dots \dots \dots (6)$$

Le coefficient de température indique la perte de puissance du panneau en fonction de l'augmentation de la température. Valeur typique, -0,45% /°C /cellule.

Un panneau a une garantie minimale de 20ans avec une réduction de la puissance maximale de sortie pendant cette période de 10% ; aussi la certification du panneau (normes CEI 12-15, IEEE-4262, 503-CEC-JRC) nous garantie sa qualité [11].

### **I.5.2 Tests des caractéristiques électriques des panneaux**

Les panneaux solaires photovoltaïques étant destinés à fonctionner par tous les temps, ils sont soumis à une série de tests normalisés de leurs caractéristiques électriques, de tenue mécanique et de vieillissement accéléré.

#### ➤ **Standard test condition « STC »**

**STC** : est un standard de condition pour tester les panneaux solaire a un ensoleillement de  $1000W/m^2$  et une température de  $25^\circ C$ .

Pour comparer les panneaux solaires photovoltaïques de différentes fabrications, il a été décidé par convention de choisir comme conditions standards STC.

➤ **Normal operating cell temperature « NOCT »**

Certaines fiches techniques indiquent la température de fonctionnement de la cellule. La « **NOCT** » est la température qu’atteint la cellule à l’intérieur du panneau en circuit ouvert sous un ensoleillement de  $800\text{W/m}^2$ , une température ambiante de  $25^\circ\text{C}$  et un vent de  $1\text{m/s}$ . Une NOCT trop élevée diminue l’efficacité du panneau. Les valeurs standard sont comprises entre  $40$  et  $50^\circ\text{C}$ ; au delà de ces valeurs la cellule perd son rendement

On utilise des simulateurs solaires pour déterminer la température NOCT, les performances électriques aux conditions standards et dans les conditions NOCT.

➤ **Rupture en verre**

Une action externe peut aboutir à la rupture de verre constituant la surface extérieure du module : installation non conforme, choc violent...

Le verre étant trempé. Toute la surface du verre est brisée. Il en résulte généralement une réduction de  $30$  à  $50\%$  de ses performances.

**I.5.3 Ensoleillement et inclinaison optimale**

Un panneau solaire capte le maximum d’énergie lumineuse quand il est perpendiculaire aux rayons du soleil, or l’angle d’incidence de ces rayons varie au cours de la journée et au cours des saisons ( le soleil est bas sur l’horizon pendant l’hiver et haut dans le ciel en été ).

Les dispositifs de poursuite de la course du soleil dans le ciel seraient donc idéaux s’ils ne présentaient pas quelques inconvénients : ils sont complexes, fragiles et coûteux, en plus leur usage ne peut se justifier qu’en absence de couverture nuageuse.

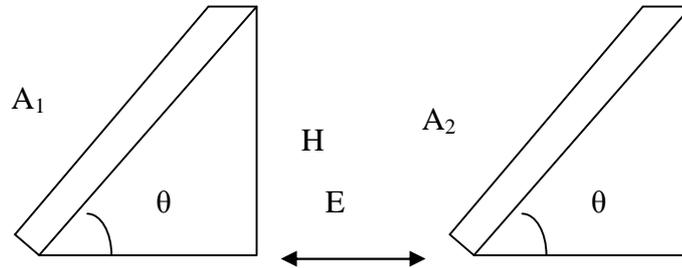
L’inclinaison optimale généralement décidée d’un panneau est donc fixe. On la choisit de manière à favoriser la production énergétique du mois le moins ensoleillé de la période envisagée d’exploitation. Dans l’hémisphère nord, l’orientation optimale est plein sud avec une inclinaison de l’ordre de  $30^\circ$  par rapport à l’horizontale.

L’angle optimum d’inclinaison est fonction de la latitude du site considéré. En pratique, on peut retenir les valeurs données sur le tableau suivant :

<b>Latitude <math>\Phi</math></b>	<b>Inclinaison <math>\alpha</math></b>
$\Phi < 10^\circ$	$\alpha = 10^\circ$
$10^\circ < \Phi < 30^\circ$	$\alpha = \Phi$
$30^\circ < \Phi < 40^\circ$	$\alpha = \Phi + 10^\circ$
$\Phi > 40^\circ$	$\alpha = \Phi + 15^\circ$

**Tableau I.3 L’inclinaison optimale [3].**

Une condition doit-elle aussi être prise en compte dans toute installation, afin d'éviter les acculassions entre modules par l'effet d'ombre, l'espace entre chaque deux panneaux doit vérifier la condition suivante :  $E \geq 2,56 H$ , comme le montre la figure



**Figure I.13 : Installation des panneaux solaires [5].**

**I.5.4 La protection des cellules et des modules**

La cellule photovoltaïque est un élément très fragile, en cas d'occultation ou d'un court-circuit accidentel, la cellule peut subir une tension inverse très élevée ou être traversée par un courant assez important.

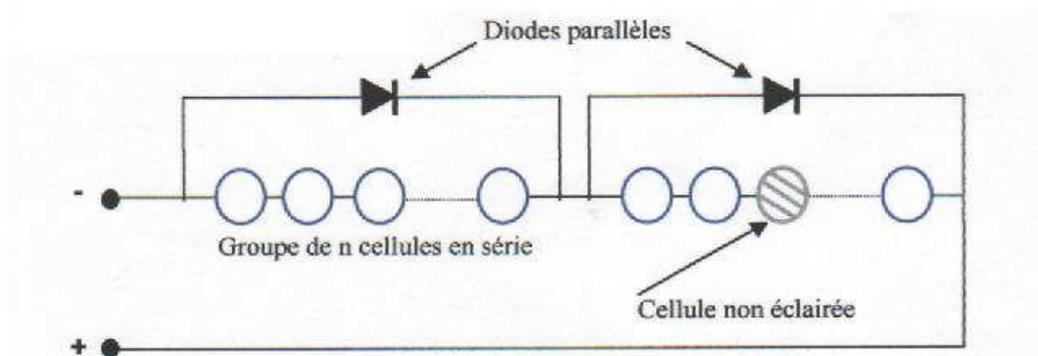
Afin de protéger les cellules et les modules photovoltaïques, on utilise des diodes de protections qui doivent être montées en série ou en parallèle.

➤ **Les diodes parallèles (shunt)**

Pour la protection des cellules contre les tensions inverses (voir figure I.14).

➤ **Les diodes séries**

Pour la protection d'une branche de module ou de cellules contre le courant inverse (voir figure I.15).



**Figure I.14: protection des cellules contre la tension inverse [3].**

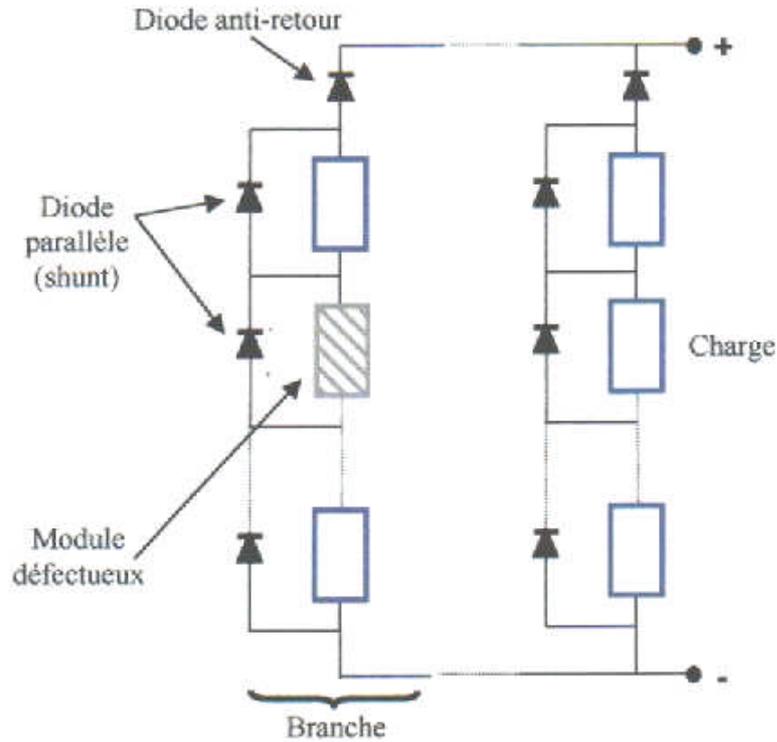


Figure I.15 : protection des modules par des diodes [3].

## I.6 Le stockage d'énergie

Les caractéristiques de l'énergie solaire posent le problème de stockage au niveau des installations photovoltaïques. En effet, l'apport et les besoins en énergie ne coïncident pas, les besoins augmentent là où les apports solaires n'existent pas, comme c'est le cas pour les systèmes d'éclairage dont le besoin augmente la nuit.

Les durées de stockage peuvent être très variables, de quelques heures (passage des nuages), d'une nuit, à plusieurs jours ou plusieurs mois pour des systèmes autonomes, et selon le degré que l'on se fixe au niveau de la sécurité d'approvisionnement. Le moyen le plus adapté aux systèmes photovoltaïques est le stockage.

Le système le plus couramment utilisé est les batteries d'accumulateurs électrochimiques qui permettent de stocker l'énergie électrique sous forme chimique pour la restituer à tout moment et sur demande grâce à des réactions réversibles.

**I.6.1 Le rôle d'une batterie**

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

- **Autonomie** : une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux, sans être rechargée ni endommagée.
- **Courant de surcharge** : une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV. Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.
- **Stabilisation de la tension** : l'un des intérêts d'une batterie est la disponibilité d'une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée.

**I.6.2 Les caractéristiques d'une batterie**

Généralement une batterie est caractérisée par un certain nombre de paramètres qui déterminent son fonctionnement qui sont :

- **La tension nominale**

C'est la tension type de la batterie, elle correspond aussi à la tension de fonctionnement du système. Aux bornes d'un élément d'accumulateur, elle est voisine de 2 V (entre 1,7 et 2,4V) suivant l'état de charge en conditions normales de fonctionnement. Elle dépend du nombre d'accumulateurs placés, ainsi une tension de 12V s'obtient en plaçant 6 éléments de 2V en série. Pour les systèmes solaires les plus utilisés, les tensions d'utilisations les plus courantes sont : 12V, 24V et 48V.

- **La charge**

Pendant la charge, l'accumulateur est un récepteur (environ 2,2V) ; en fin de charge (point M), on note un accroissement rapide de la tension, les plaques complètement polarisées, la fin de charge est atteinte à 2,6V ou 2,7V en charge cyclique.

- **La décharge**

Pendant la décharge, la force électromotrice varie en fonction du temps. Durant une assez longue durée d'utilisation, elle reste remarquablement constante à la valeur de 2V environ. A partir du point N, elle diminue brusquement (1,8V), il faut alors recharger l'accumulateur.

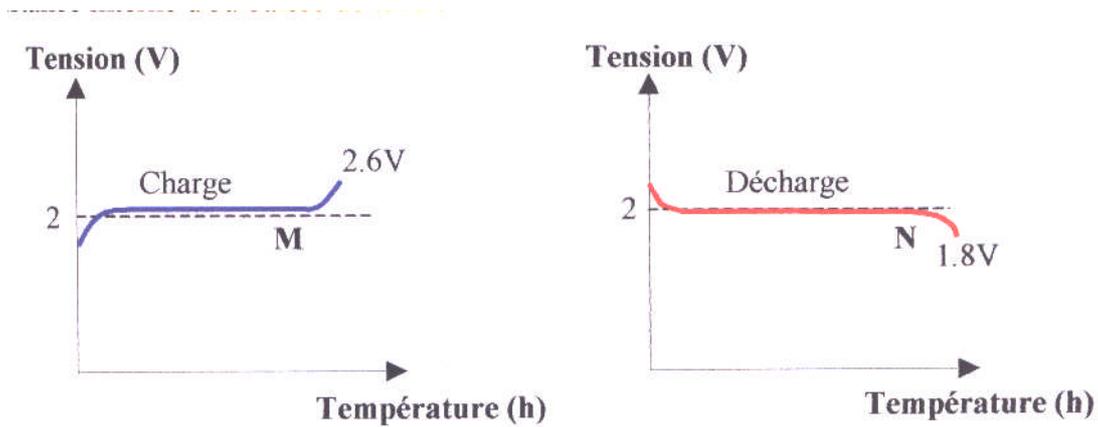


Figure : 1.16 : caractéristique charge et décharge d'une batterie

• **Rendement**

Le rendement charge /décharge : est le rapport entre la quantité d'électricité débitée à la décharge  $Q_d$  et celle fournit lors de la charge  $Q_c$  .tel que :  $\eta = Q_d/Q_c$  ; il est calculé en Ah et en pourcentage, ce rendement est pratiquement constant pour une batterie neuve on prend une valeur de 0,9 enAh.

Il est fortement fonction de l'état de charge de la batterie : pour un état de charge « moyen », il est élevé et il baisse ensuite rapidement lorsque l'on atteint la fin de charge et que le courant n'est plus absorbé.

• **Capacité**

La capacité d'une batterie est la quantité d'énergie que l'on peut stocker et que l'on peut restituer par celle-ci sous une tension nominale; elle est exprimée en ampère-heure(Ah).

Une batterie de100 Ah permet théoriquement de fournir 1ampère durant 100 heures (ou bien 2A pendant 50h). Plutôt 100Ah pendant une heure.

Les batteries usuelles pour le solaire se pressentent soit en éléments 2 volts montes en série, soit en blocs 6 ou 12 volts.

• **Autodécharge**

C'est le rapport entre la quantité d'énergie perdue sans utilisation et la quantité d'énergie stockée, ou bien c'est la perte de capacité obtenue en laissant l'accumulateur au repos pendant un temps donné telque :

$$\tau(\%) = (Q_a - Q_p/n \times Q_a) \dots\dots\dots(7)$$

Elle augmente avec l'âge tel que :

$Q_n$ : Capacité avant stockage ;

$Q_p$ : Capacité après stockage ;

$n$ : Durée de stockage en mois.

La plupart des batteries modernes sont à faible autodécharge, c'est-à-dire qu'elles perdent moins de 3% de capacité par mois à 20°C.

- **Profondeur de décharge (PDD)**

C'est le pourcentage d'énergie maximum que l'on peut retirer d'une batterie. Elle ne doit pas être déchargée au delà de cette valeur, afin de prolonger sa durée de vie.

En général, on choisit PDD égal à 25% pour 2jours d'autonomie ou moins, 70% pour 4jours et 80% pour plus de 8jours d'autonomie

- **La durée de vie**

Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent ; c'est le nombre de séquences de charge/décharge que peut subir une batterie à sa profondeur de décharge. Le nombre de cycles maximal et la durée de vie sont fortement dépendants de la technologie de fabrication et des conditions ainsi que le mode d'utilisation de l'accumulateur, donc il a une durée de vie totale exprimée en année.

### **I.6.3 Types de batterie**

➤ **Batterie en nickel** : trois matériaux différents sont utilisés avec le nickel : le cadmium, les hydrures métalliques et le Zinc :

- Batterie NiCd avec l'interdiction à l'échelle européenne, le futur de cette technologie est très compromis ;
- Batterie NiMH : sont en train de remplacer les NiCd pour des raisons environnementales ;
- Batterie NiZn : peu de constructeurs proposent des modèles et nous n'avons pas encore de données pour estimer leur intérêt dans cette étude.

➤ **Batterie en lithium**

Ce type de batterie utilisent beaucoup de matériaux en électrolytes associées au lithium ; par exemple, les couples lithium/métal, lithium/ion, lithium/ polymère. Toutes ces technologies présentent des avantages et inconvénients :

- Les batteries LI-métal : abandonnées car elles sont dangereuses et explosives en cas de court-circuit interne. Des développements sont en cours pour les rendre plus stables.

- Les batteries Li-ion : présente un comportement beaucoup plus stable : les cellules atteignent 3 à 4v et la densité énergétique est la plus élevée aujourd'hui pour une batterie longue durée.
- Les batteries Li-polymère utilisent des technologies sèches avec des matériaux en feuilles empilées et enroulées ; l'intérêt est d'augmenter encore la densité énergétique pour les applications portables.

Les propriétés du lithium le destinent plutôt aux applications portables ou la grande densité énergétique, son rendement élevé et son auto décharge très faible sont de grands avantages. Il est peu probable qu'il sera largement utilisé dans le système photovoltaïque de puissance.

#### ➤ **Super condensateur**

Les technologies comme les super-condensateurs ont des propriétés qui les destinent aux mêmes applications de stockage à très court terme avec des grandes durées de vie. Ces éléments servent plus souvent pour leur propriété de filtrage ou de lissage d'énergie que pour le stockage réel.

Il y'a très peu de chance qu'il soit un jour utilisé dans les applications d'électrification rurale.

#### ➤ **Batterie métal-air**

Rechargeables demandent une infrastructure complexe à mettre en œuvre : le faible nombre de cycles peut être augmenté au prix de recyclage des électrodes qui doivent être démontées et remplacées régulièrement dans les bacs de batterie .Mais l'intérêt premier de cette technologie est sa grande densité énergétique qui la limite probablement aux applications portables à court terme car l'autodécharge est très élevée.

#### ➤ **Système Redox**

Les batteries Redox utilisent des électrodes plongées dans deux liquides servant de stockage d'énergie.

Les applications actuelles des batteries Redox sont plutôt comme source d'énergie de crête à la demande dans les réseaux. La grande variété des technologies en compétition rend leur évaluation difficile et leur utilisation comme stockage d'énergie renouvelable n'est pas encore compétitive.

#### ➤ **Batterie au plomb**

La batterie au plomb est un composant possédant deux électrodes de « plomb et d'oxyde de plomb » plongées dans un électrolyte composé d'acide sulfurique dilué. En reliant les électrodes à un récepteur externe consommant du courant, elles se transforment en sulfate

de plomb et l'acide se dilue, phénomène qui permet d'évaluer l'état de charge de la batterie en mesurant la densité d'acide.

Durant la décharge, une partie de l'électrolyte se lie au plomb et la transforme en sulfate de plomb ; cette transformation produit de l'eau ce qui fait baisser la densité de l'électrolyte. Cette variation de densité est utilisée pour contrôler l'état de charge et elle a aussi un autre effet important qui limite l'emploi des batteries à basse température. En effet, sa température de congélation augmentant lorsque la batterie est déchargée.

Les premières batteries utilisaient des plaques de plomb solides, leurs désavantages c'est qu'elles sont lentes à fabriquer (donc chères), et elles sont très lourdes avec une mauvaise densité énergétique.

Les batteries au plomb ne survivent rarement à une décharge totale, donc on limite la décharge à 40% de la capacité maximale (pour usage solaire).

Pour éviter ces problèmes, de nouvelles modifications dans l'électrode, permettent ainsi une fabrication plus aisée et moins chère. Cette construction est encore la règle d'aujourd'hui.

Chaque cellule de batterie au plomb fournit une tension moyenne de 2V et l'on assemble en série /parallèle le nombre d'éléments nécessaires pour atteindre une tension et courant désirés.

La batterie dans système photovoltaïque représente environ 15% de l'investissement mais sur une durée d'exploitation de 20 ans, elle dépasse en général les 50% du coût global du système, aussi il est très important d'améliorer ce composant pour abaisser le coût de l'énergie produite.

Vu le développement des systèmes solaires et des grands besoins d'électrification, un projet européen s'est intéressé à réunir les compétences pour faire point sur les techniques de stockage. Les technologies comparées étaient : les batteries au plomb, au lithium, super condensateurs, métal air, et système redox.

Ainsi nous pouvons esquisser de cette étude quelques conclusions et faire le point sur les principaux développements récents de la batterie au plomb qui restera un composant incontournable pour encore des décennies. En effet, ce développement consiste à améliorer le nombre de cycles et la durée de vie des batteries traditionnelles ainsi les batteries plomb sont développées et elles peuvent assurer environ deux fois plus de cycles et durer pour longtemps.

**I.7 Régulateurs**

Dans un système photovoltaïque comprenant une capacité de stockage nécessite d'insérer un système de régulation de la tension de la batterie, il se place entre les modules et la batterie

Il déconnecte le générateur photovoltaïque lorsque la batterie est chargée, il déconnecte également la charge d'utilisation en cas de décharge profonde.

**I.8 Onduleurs**

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue-alternative (DC/AC) grâce à des semi-conducteurs afin d'alimenter des charges typiquement alternatives, donc il permet d'obtenir une tension ou un courant alternatif à partir d'une source continue.

Comme tous les convertisseurs statiques, un onduleur est très dépendant des caractéristiques du générateur et du récepteur entre lesquels il est inséré.

**I.8.1 Les caractéristique d'un onduleur :**

Les critères de choix d'un onduleur sont nombreux et s'appuient sur l'exigence de la charge électrique et du système installé, et on peut citer quelques un :

➤ **Le rendement**

C'est le critère principal dans le choix d'un onduleur, car on souhaite maintenir élevé l'efficacité du système. Il est définit comme étant le rapport de la valeur efficace de la puissance de sortie sur la valeur de la puissance d'entrée continue, un onduleur efficace est celui qui aura un rendement élevé sur une grande plage de puissances possibles

$$\eta = P_{AC} / P_{DC} \dots\dots\dots (8)$$

➤ **La tension d'entrée**

Dans le cas d'un système autonome, elle correspond a la tension du système mis en Place. On peut aussi choisir cette tension en se référant a la méthode suivante, en fonction de la demande en électricité « D » :

- Si  $D < 2Kw$  alors  $U_e = 12V_{cc}$
- Si  $2 < D < 5Kw$  alors  $U_e = 24$  ou  $48V_{cc}$  [11]
- Si  $D > 5Kw$  alors  $U_e = 48 V_{cc}$  ou plus

➤ **La tension d'entrée :** C'est la gamme de la tension d'entrée acceptable durant le fonctionnement de l'onduleur.

➤ **La puissance nominale :** C'est celle que peut délivrer l'onduleur en fonctionnement permanent.

➤ **La forme d’onde :** Les appareils qu’alimente l’onduleur doivent pouvoir supporter la forme d’onde de sortie de l’onduleur. Il faut donc connaître les tolérances sur la tension et la fréquence de chaque appareil susceptible d’être alimenté par l’onduleur.

➤ **Distorsion harmonique (THD) :** Certains appareils électroniques peuvent créer des harmoniques qui déforment le signal de sortie de l’onduleur ; ce qui peut avoir effet de produire un dysfonctionnement de l’application (échauffement indésirable, surcharge, perturbation d’autres appareils..). L’onduleur doit pouvoir maintenir une distorsion harmonique la plus faible possible.

**I.8.2 Types d’onduleurs**

On distingue deux types d’onduleur :

- Les onduleurs de tension : ils sont alimentés par une source de tension continue, les charges qui leurs sont connectées doivent être de type récepteurs de courant, ce qui est utilisé dans les systèmes photovoltaïques.
- Les onduleurs de courant : ils sont reliés à une source de courant continue et leurs charges sont impérativement de type récepteurs de tension.

La large gamme des onduleurs disponibles sur le marché au près de nombreux fabricants est donnée dans le tableau I.4 :

Onduleur	Fabricant	Puissance nominale de sortie (VA)	THD (%)	Fréquence de sortie (Hz)	Tension de sortie V <sub>AC</sub>	Rendement maximum (5%)
INGECON	Ingeteam	2500	< 5	50	220/230	94
TAURO	Atersa	700-3000	<4	50±5%	220±7%	93
SUNMASTER	Mastervolt	1500-5000	<3	50	230	94
SUNNY BOY	SMA	700-2600	<4	50	180-265	93,6
PROSINE	Xantrex	1000-1800	<4	50	120/230±3%	90

*Tableau I.4 : Caractéristiques de quelques onduleurs du photovoltaïque. [2]*

**Conclusion**

Dans ce premier chapitre, il a été constaté qu'une installation photovoltaïque est un système qui assure la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique par l'effet photovoltaïque, afin d'alimenter des charges électriques. Ce système comprend dans la majorité des cas un stockage de l'énergie électrique par l'intermédiaire des batteries d'accumulateurs, pour réaliser une adéquation entre la consommation et les apports solaires variables dans le temps.

Le régulateur de charge est un système important dans le contrôle automatique de l'état de charge de la batterie. Ce contrôle a pour objectif d'augmenter la durée de vie du système de stockage, en évitant les surcharges et les décharges profondes, il est donc l'élément pilote de l'installation photovoltaïque considérée.

**Introduction**

Les installations photovoltaïques possédant un dispositif de stockage, qui est l'un des éléments le plus fragile du système, pour augmenter la durée de vie de la batterie et assurer sa protection on lui associe un système de régulation.

Ce présent chapitre a pour but la représentation des différents systèmes photovoltaïques ainsi les stratégies de régulations de charge et de décharge des batteries solaires qui assureront le contrôle et la gestion du fonctionnement des installations photovoltaïques.

**II.1 Les différents systèmes photovoltaïques**

Il existe différents types de générateurs variant selon le service souhaité et les applications recherchées.

**II.1.1 Systèmes autonomes**

Il y a les systèmes autonomes au fil du soleil (sans stockage) et avec stockage :

**a. Système au fil du soleil**

Ce sont les systèmes les plus simples puisque l'énergie photovoltaïque est utilisée directement à partir des panneaux. On peut les trouver dans les deux cas suivants :

**• Alimentation directe**

L'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence de la lumière et dès que l'éclairement sera suffisant pour atteindre la puissance demandée.

C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de lumière.

S'il y a de la lumière, ça fonctionne, sinon ça s'arrête, mais l'inconvénient de ce système c'est qu'on ne profite pas toujours des éclaircissements les plus élevés : pas de stockage, donc pas de récupération des surplus d'énergie solaire.

**• Pompage au fil du soleil**

Il s'agit de stocker de l'eau dans un réservoir. La pompe solaire est branchée directement sur les panneaux solaires par l'intermédiaire d'un régulateur. Le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est donc variable, directement en fonction du rayonnement solaire.

**c. Systèmes autonomes avec stockage**

Ces installations se composent essentiellement de trois principaux composants : des modules solaires, la batterie, et du régulateur de charge. La batterie d'un tel système se charge le jour, et sert de réservoir d'énergie en permanence. Elle peut sans problème, à un instant donné, recevoir un courant de charge et débiter un courant de décharge de valeur différente.

Les appareils alimentés sont donc câblés sur la batterie au travers du régulateur de charge, cela pour assurer le chargement optimal de l'accumulateur tel que lorsque la batterie est pleine, ce dernier coupe la charge pour éviter qu'elle ne souffre de surcharge.

### **II.1.2 Les systèmes autonomes hybrides**

Une des limites d'un système autonome purement photovoltaïque, comme on vient de le décrire, est qu'il fournit une puissance donnée, variable selon la saison, mais que l'on ne peut pas dépasser, au risque de détruire la batterie. Or les consommateurs que nous sommes ne sont pas des machines et ont des besoins qui évoluent, et pas forcément en phase avec les saisons.

Avoir un système hybride, c'est disposer d'une autre source d'électricité qui vient compléter l'apport photovoltaïque. Cette autre source peut être un groupe électrogène (appelé aussi « génératrice ») ou une éolienne. De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie et donc ils permettent en outre de recharger la batterie lorsque elle est faible.

Un tel système photovoltaïque hybride fournit une grande fiabilité du système et peut représenter la solution adéquate pour les sites isolés; il convient aussi lorsque la demande en énergie est élevée (pendant l'hiver ou tout au long de l'année).

### **II.1.3 Les systèmes raccordés au réseau**

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau. Généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement. L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement dans le réseau local ou national. Et ce ci sans limites quantitatives, donc toute l'énergie est récupérée. Il y a un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation, et un autre dans l'autre sens pour la production.

## **II.2 Rôle des régulateurs de charges :**

Le régulateur est l'élément central d'un système photovoltaïque autonome : il contrôle les flux d'énergie, il doit protéger la batterie contre les surcharges (solaire) et décharges profondes (utilisateur), il doit également assurer la surveillance et la sécurité de l'installation (surcharge, alarmes, fusibles, inversion de polarité). Dans les systèmes les plus élaborés, il peut aussi commander la recharge par d'autres sources d'énergie (génératrice d'appoint, éolienne, hydraulique). Dans certains cas, il peut aussi réaliser une transformation de puissance (recherche du point de puissance maximum, Max Power Tracker, MPT).

Accessoirement, il affichera des indications concernant l'état de charge des batteries et les paramètres de fonctionnement du système.

II.3 Les stratégies de régulation des installations photovoltaïques

II.3.1 Les différents cas de fonctionnement [3]

Pour un système donné, cinq modes de fonctionnement peuvent exister en fonction du flux solaire (ensoleillement) et du courant d'utilisation (hors régulation).

➤ Cas 1

- ❖ La charge est déconnectée ;
- ❖ Le courant du module, fonction de l'ensoleillement, charge la batterie ; (figure II.1).

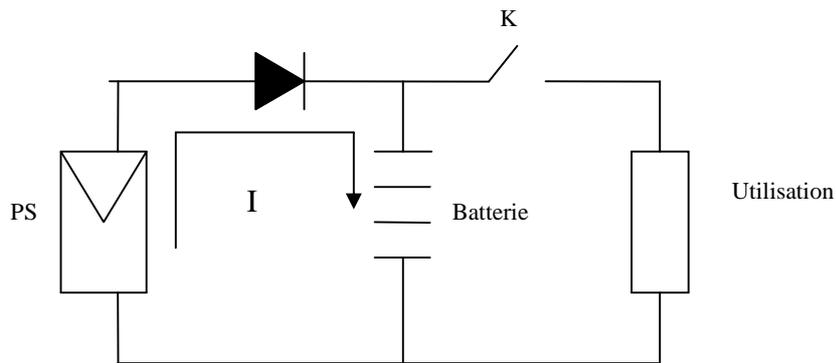


Figure II.1 : Schéma de principe pour le cas 1.

➤ Cas 2

- ❖ La charge est connectée ;
- ❖ Le courant  $I_p$  est supérieur au courant d'utilisation  $I_p = I_b + I_u$  ;
- ❖ Le courant excédentaire charge la batterie ; (figure II.2).

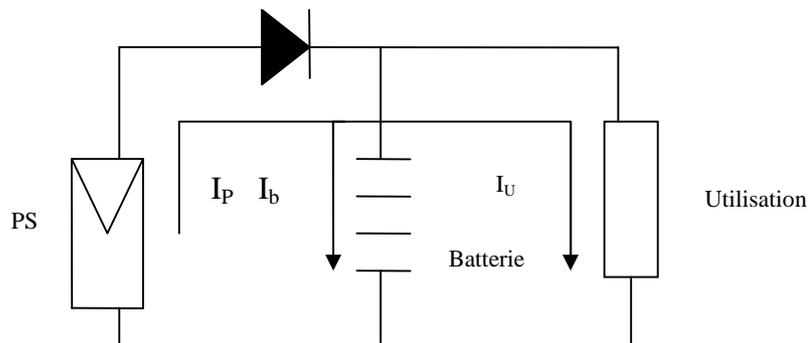


Figure II.2 : Schéma de principe pour le cas 2.

➤ Cas 3

- ❖ La charge est connectée ;
- ❖ Le courant du champ se trouve, pour un ensoleillement donné, égal au courant d'utilisation  $I_p = I_u$  ;
- ❖ Aucun courant ne traverse la batterie  $I_b = 0$  ; (figure II.3).

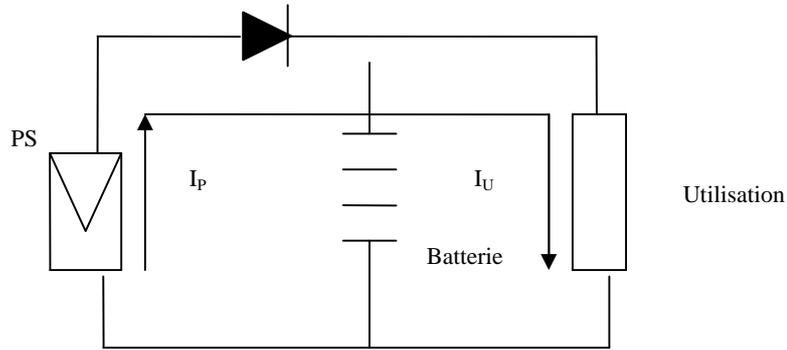


Figure II.3 : Schéma de principe pour le cas 3.

➤ Cas 4

- ❖ La charge est connectée ;
- ❖ Le courant venant du champ est inférieur au courant d'utilisation ;
- ❖ La batterie se décharge en fournissant le courant déficitaire  $I_u = I_b + I_p$  (Figure II.4).

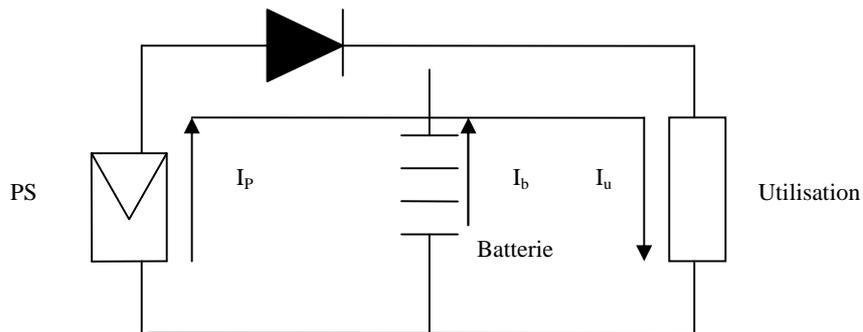


Figure II.4 : Schéma de principe pour le cas 4.

## ➤ Cas 5

- ❖ La charge est connectée
- ❖ Le courant venant du champ est nul  $I_p = 0$  (période d'obscurité) ;
- ❖ La diode anti-retour est bloquée ;
- ❖ La batterie se décharge en fournissant le courant d'utilisation  $I_b = I_u$  ; (Figure II.5).

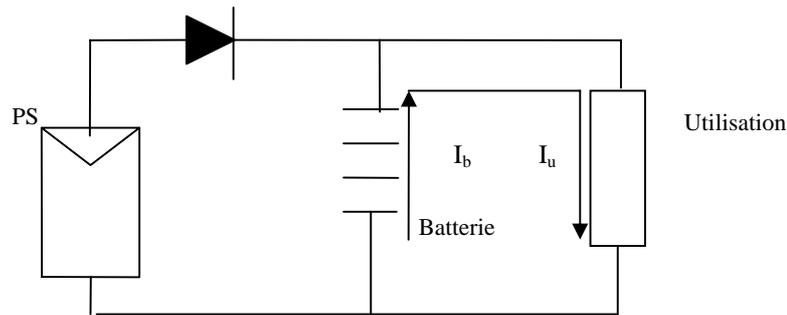


Figure II.5 : schème de principe pour le cas 5.

### II.3.2 Fonctions d'un régulateur

#### ➤ Contrôle de la charge

Le contrôle de la charge est la fonction la plus critique déterminant la durée de vie de la batterie. La difficulté de ce travail provient de la nature de la source d'énergie qui n'est pas toujours disponible. Pour garantir une durée de vie élevée d'une batterie, il faudrait après chaque décharge pouvoir la recharger à 100%, hors avec la nature aléatoire de l'ensoleillement, il n'est pas toujours possible d'effectuer une recharge complète et la batterie va souvent rester plusieurs jours dans un état de charge « moyen », ce qui à long terme peut réduire la durée de vie de ce composant. [9]

On peut imaginer plusieurs techniques utilisant soit la mesure de la tension, soit la mesure du courant entrant et sortant pour régler une batterie. En fait, la mesure de la tension est beaucoup plus simple et la grande majorité des régulateurs utilise ce paramètre.

La tension d'une batterie chargée à courant constant augmente de façon linéaire jusqu'à ce qu'elle atteigne pratiquement la fin de charge où soudainement elle augmente beaucoup plus rapidement et pour éviter qu'elle soit surchargée, on utilise un régulateur de charge qui maintient la batterie dans un état voisin de la pleine charge. Cette condition de fonctionnement dite : batterie flottante ou floating. [3,9]

**➤ Contrôle de la décharge**

Afin d'éviter une décharge profonde de la batterie qui est fortement nuisible pour sa durée de vie, on ajoute un circuit qui limitera sa profondeur de décharge, en déconnectant les récepteurs lorsque la tension de la batterie est descendue au-dessous d'un seuil critique. Si le seuil choisi est assez élevé, la batterie durera plus longtemps.

Différents systèmes électroniques sont réalisés pour limiter la charge et la décharge des accumulateurs, rôle généralement assuré par le système de régulation (régulateur) associé.

**II.3.3 Principe de fonctionnement d'un régulateur**

L'indicateur utilisé dans la régulation électronique des systèmes photovoltaïques est la tension aux bornes de la batterie, en effet cette grandeur est facile à mesurer et capable de donner une estimation de l'état de charge

Le régulateur doit maintenir l'état de charge des batteries entre deux seuils, un seuil haut et un seuil bas à ne pas dépasser, donc la régulation est obtenue par limitation en tension de la batterie afin d'éviter :

- ❖ Une surcharge entraînant une perte en eau ;
- ❖ Un vieillissement prématuré des accumulateurs.

La protection contre la décharge profonde est réalisée par un disjoncteur automatique dont le but est d'éviter la sulfatation des plaques.

**II.3.4 Les caractéristique du régulateur****❖ Tension nominale**

Elle doit pouvoir supporter la tension en circuit ouvert du panneau photovoltaïque à soit environ deux fois sa propre tension nominale.

**❖ Courant d'entrée**

C'est le courant de charge maximum provenant des panneaux et que le régulateur peut contrôler sous une tension donnée. Choisir 1,5 fois le courant de court-circuit des panneaux photovoltaïque pour un régulateur shunt et 1,5 fois le courant nominale des panneaux photovoltaïque pour un régulateur série.

**❖ Courant de sortie**

C'est le courant maximum que tirent les appareils branchés simultanément.

**❖ Protection**

Les conducteurs arrivant au régulateur doivent être protégés contre les surcharges, l'inversion de polarité et l'augmentation de température.

**II.3.5 Les techniques de régulation [3]**

Les régulateurs de charge de systèmes photovoltaïque autonomes peuvent se caractériser en trois groupes principaux :

- Les régulateurs série, qui incorporent un interrupteur entre le générateur et l'accumulateur pour arrêter la charge ;
- Les régulateurs shunt, dont l'interrupteur court-circuite le générateur solaire en fin de charge ;
- Les régulateurs à recherche de point de puissance maximum (maximum power tracker, MPT), qui utilisent un circuit électronique spécial permettant de soutirer en permanence du champ de capteurs sa puissance maximale.

À ces trois types de circuits, on ajoute en général un régulateur de décharge pour empêcher les décharges profondes de la batterie.

**II.3.5.1 La régulation de charge parallèle (shunt)**

Ce type de régulateur convient aux applications de petite puissance. Son principe consiste à dériver une partie de l'énergie électrique délivrée par le générateur photovoltaïque, et cela par l'intermédiaire d'un interrupteur (transistor) ; en effet lorsque les batteries ont atteint leur pleine charge, le régulateur shunt intercepte le courant en provenance du champ et l'envoie directement à la terre (ou à une borne négative), par l'intermédiaire d'une charge résistive.

Il faut ajouter impérativement une diode entre cet interrupteur et la batterie pour ne pas court-circuiter la batterie. Cette diode joue également le rôle de blocage du courant nocturne pouvant s'écouler de la batterie vers le panneau.

Tant que, la tension aux bornes de la batterie est faible, le courant  $I$  et la tension  $U$  aux bornes de la résistance  $r$  seront faibles également donc le transistor est bloqué.

$$I_R = 0 \quad ; \quad I_b = I_p - I$$

Le courant délivré par le générateur passe dans la batterie, dès qu'on atteint la tension de référence de la diode zener le courant  $I$  et la tension  $U$  croit brusquement, ainsi le transistor devient conducteur et délivre un courant  $I_e$  ; d'où :

$$I_b = I_p - I - I_e$$

Avec :

$I_p$  : Le courant provenant du champ photovoltaïque

$I_b$  : Le courant traversant la batterie

$I_e$  : Le courant délivré par le transistor

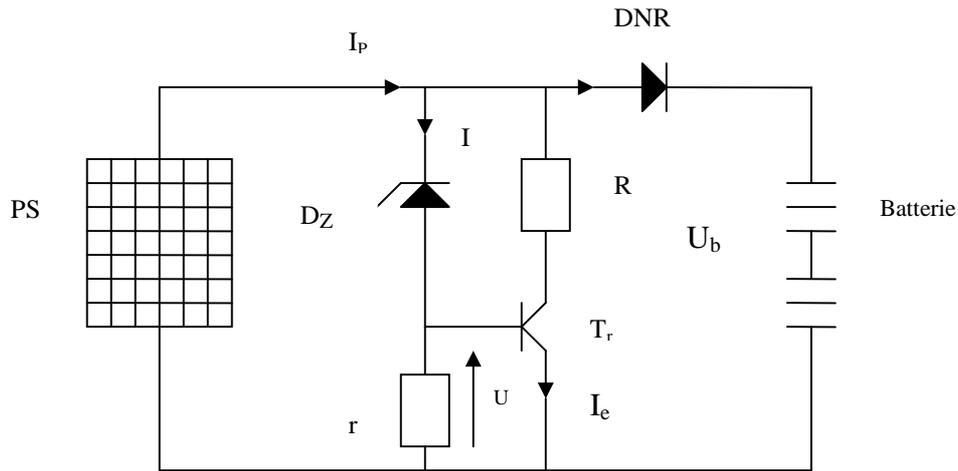


Figure II.6 : schéma électrique d'un régulateur de charge shunt.

#### ➤ Avantages du montage

- Consommation propre négligeable ;
- La régulation ne consomme pas l'énergie stockée, car celle-ci est placée avant la diode anti retour ;
- La batterie est chargée complètement.

#### ➤ Inconvénients du montage

- L'interrupteur voit à ses bornes la tension totale du panneau, ce qui peut poser des problèmes de protection contre les surtensions ;
- La dissipation thermique de l'interrupteur peut être élevée à grand courant ;
- D'autre part en court-circuitant le panneau lorsque la batterie est pleine, le risque de hot-spot augmente, la tension inverse répercutée sur la cellule ombrée étant plus élevée.

### II.3.5.2 La régulation de charge série

Le régulateur de charge intervient en série avec le panneau solaire. Le courant délivré par le panneau solaire charge la batterie à travers l'interrupteur (absence de régulation), dès que la batterie est chargée, l'interrupteur s'ouvre.

Tant que la tension  $U_b$  aux bornes de la batterie est inférieure à la tension de la diode zener  $U_z$ , le courant délivré par le panneau solaire charge la batterie à travers le transistor (absence de régulateur), dès que la tension de la batterie devient supérieure à celle de la diode zener, le transistor se bloque, et le courant ne passe qu'à travers la résistance (apparition de la

régulation). Donc le régulateur série ouvre le circuit électrique pour couper le courant qui provient du champ PV.

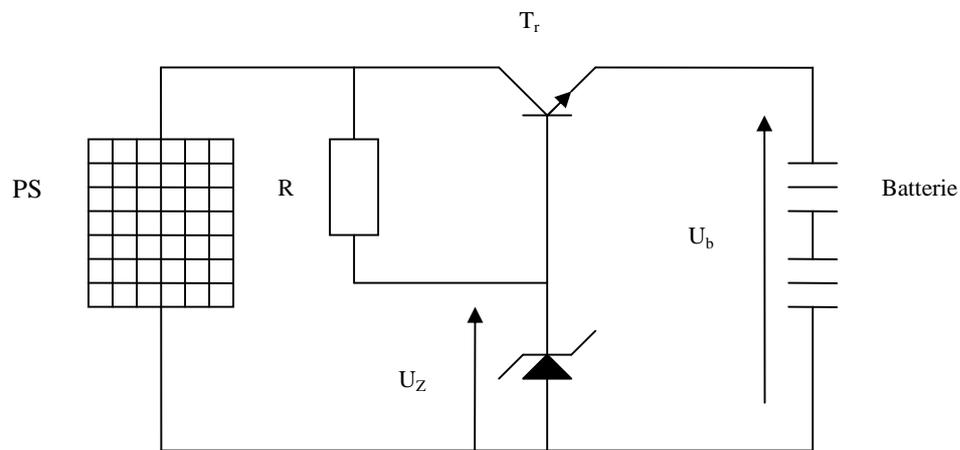


Figure II.7 : schéma électrique d'un régulateur de charge série.

➤ **Avantage du montage**

- Simple et fiable ;
- Moins coûteux ;
- Le transistor évite de faire passer le courant de la batterie vers le panneau solaire.

➤ **Inconvénients du montage**

- Fin de charge difficile à atteindre ;
- Par rapport au type shunt, l'interrupteur ici selon sa résistance de passage ajoute une chute de tension supplémentaire entre les panneaux et la batterie.

### II.3.5.3 Régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Dans ce régulateur, un circuit mesure en permanence la tension et le courant du panneau pour tirer de l'énergie au point de puissance maximale (MPT : Max Power Tracking). Ceci permet de garantir que le maximum d'énergie sera récupéré, quelque soient la température et l'ensoleillement. Ces régulateurs fonctionnent soit en élevant, soit en réduisant la tension. Un premier circuit ajuste la demande au point de puissance maximale de l'ensemble des panneaux et le deuxième circuit transforme le courant et la tension pour l'adapter au type de batterie. [9]

Donc pour exploiter le maximum de la puissance disponible, il est intéressant d'adapter la charge avec une commande dite MPPT au moyen d'un régulateur (MPPT : Maximum Power Point tracking), qui optimise en permanence la tension de travail pour tirer

un maximum de puissance du panneau en toutes circonstances, quelque soient l'ensoleillement et la température. [10]

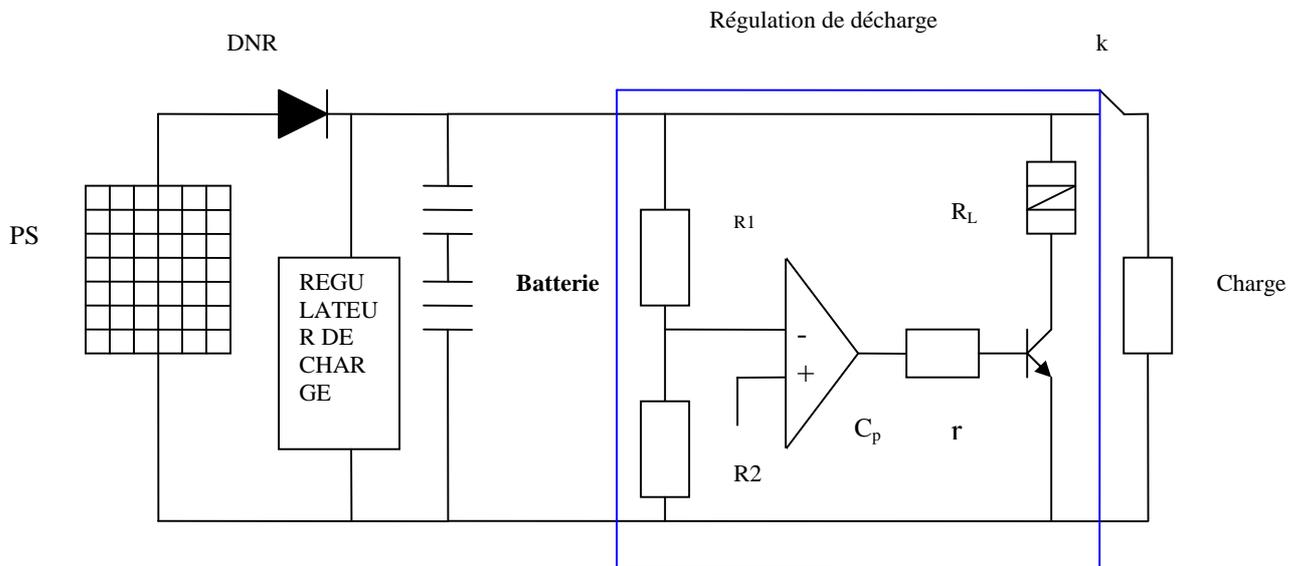
Il calcule alors le niveau de puissance maximum que :

- Le panneau peut délivrer à la batterie.
- La batterie est capable de recevoir.

A partir de cette valeur de puissance, il détermine la tension (voltage ) la plus adaptée afin d'avoir le maximum d'Ampères dans la batterie. [11]

**II.3.5.4 La régulation de décharge par disjonction automatique**

Le schéma de principe de ce régulateur est représenté sur la (figure II.8), il est constitué d'un comparateur qui compare la tension aux bornes de la batterie à un seuil bas et transmet l'information à un circuit de commande qui arrête la décharge lorsque la tension de la batterie atteint ce seuil.



*Figure II.8 : schéma électrique d'un régulateur de type disjoncteur.*

**II.4 Optimisation du fonctionnement**

Le générateur photovoltaïque transforme directement l'énergie solaire en énergie électrique, cette énergie varie en fonction de certains paramètres du fait que les générateurs PV présentant une caractéristique I-V non linéaire variant avec le flux solaire et la température de fonctionnement des modules solaires.

Pour obtenir la puissance maximale possible du générateur photovoltaïque, il est nécessaire, de disposer d'une impédance variable qui force à chaque instant le générateur à travailler au point de puissance max de la caractéristique I-V correspondant. En effet il faut

que l'impédance interne du générateur soit bien adaptée à l'impédance de charge ce qui permet d'assurer la poursuite du point de puissance max. ce problème peut être résolu en utilisant un convertisseur, qui consiste en un interrupteur électronique (transistor, thyristor), il doit être inséré entre le générateur et la charge et dont le contrôle du rapport cyclique permet de maintenir ce point au point de puissance max.

Un tel système est couramment appelé système de poursuite du point de puissance maximale.

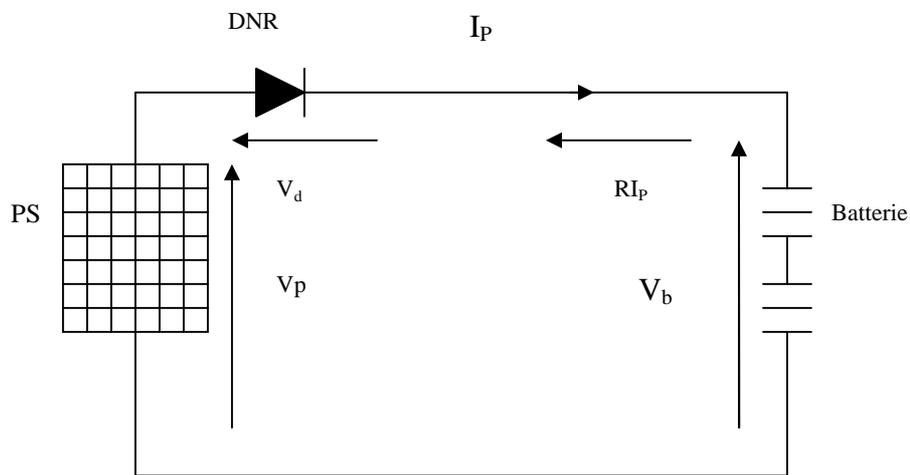
Il doit assurer le transfert de cette puissance quelque soit les conditions réelles de travail (variation du rayonnement solaire et de la température ambiante, vieillissement des cellules) ou de la charge proprement dite.

**II.4.1 Fonctionnement au point de puissance maximum [3]**

L'étude d'adaptation (figure II.9) d'un module PV branché sur une batterie revient à superposer les caractéristiques I-V du module photovoltaïque et de la batterie en charge.

En première approximation, on considère qu'un accumulateur se charge sous une tension presque constante, en dehors des courtes périodes de début et la fin de charge.

On exprime la tension de la batterie  $V_b$  en fonction de deux paramètres : la force contre électromotrice (fem)  $E_0$  et la résistance interne  $r$  qui est très faible.



*Figure II.9 : schéma d'adaptation des modules sur batterie.*

En réalisant la liaison modules-batteries, le point de fonctionnement du module sera déterminé par l'intersection de deux courbes caractéristiques.

$$I=f(v)$$

$$V_p = V_b + RI_p + V_d = E_0 + V_d + (r + R) I_p$$

Avec :

$I = f(V)$  : caractéristique du module photovoltaïque ;

$V_b$  : caractéristique de la batterie ;

$V_d$  : chute de tension dans la diode ;

$R$  : résistance électrique des câbles.

Une bonne adaptation est obtenue lorsque la caractéristique de charge est pratiquement perpendiculaire à l'axe des tensions dans la zone des puissances optimales. Cette condition justifie le nombre de 36 cellules en moyenne pour les modules adaptés à la recharge d'une batterie de tension nominale 12V. En effet, la tension correspondante aux points de puissance maximale (14,3V à 60°C) est égale à la chute de tension dans les câbles et diodes (0,8V) additionnée à la tension de fin de charge de la batterie (6 x 2,25 V/élément pour le plomb).

La figure suivante représente la superposition des caractéristiques de charge et des modules afin d'obtenir l'adaptation adéquate.

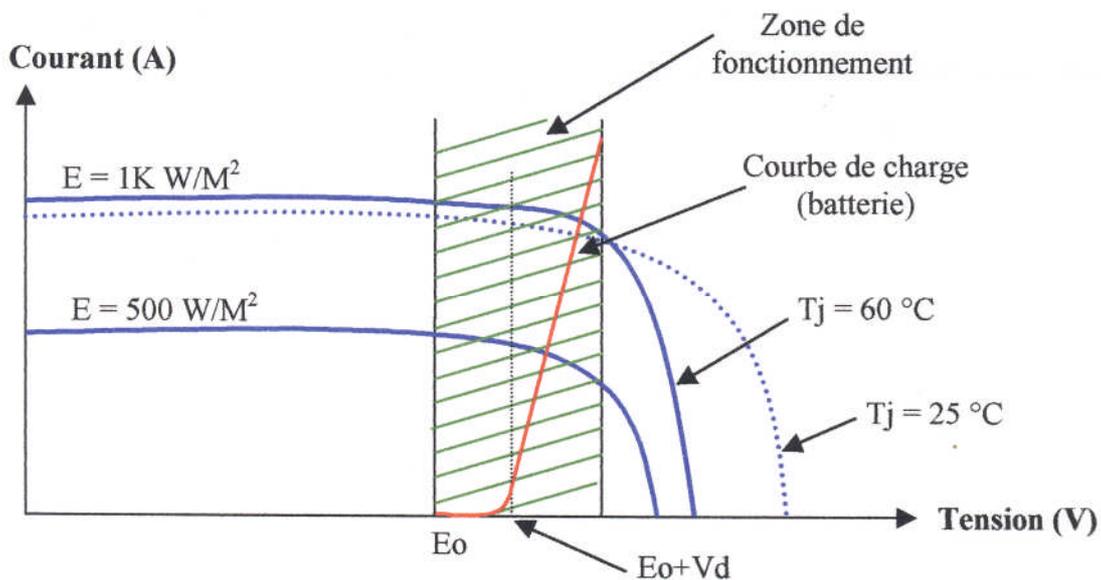


Figure II.10 : Intersection des caractéristiques du module et de la batterie (Zone de fonctionnement).

**II.4.2 la technique moderne de régulation des systèmes photovoltaïque :**

La plupart des nouveaux modèles de régulateurs MPPT disponibles sont pilotés et contrôlés par un microprocesseur. Ces régulateurs savent quand et comment ajuster le signal électrique en sortie ( envoyé à la batterie ). Il sont capable d'interrompre l' alimentation pendant quelques microsecondes afin d'analyser le dispositif batterie et les panneaux solaires, cela afin de réaliser les ajustements nécessaires ( optimisation et réglage des paramètres de conversion du courant ).

La baisse des coûts des microprocesseurs les ont rendus accessibles pour les installations de taille inférieure à 1KW.

**❖ Régulateurs de charge intelligents**

Ce sont des régulateurs préprogrammés qui contiennent plus de fonctions par rapport aux régulateurs classiques. Ils permettent une régulation de charge et décharge plus précise, ils offrent aussi une visualisation du contrôle à travers des afficheurs intégrés qu'ils contiennent.

Aujourd'hui se développent des régulateurs de charge /décharge a microprocesseur, dont la maintenance est simplifié par débrogage sans intervention sur le câblage du générateur.

**❖ Régulation logicielle**

Dans ce cas le système comprend un ou plusieurs éléments de type numérique (micro-ordinateur) ; la tache de régulation est confiée aux microprocesseurs, les logiciels élaborés commanderont la régulation : on aura donc la régulation assistée par micro c'est : la régulation digitale des systèmes photovoltaïque ; cette technique permet aussi l'acquisition des données, est la visualisation graphique ou numérique de certains paramètres d'où la facilité de contrôle.

Il est aussi possible de surveiller le fonctionnement des installations à distance par télécommunication.

**❖ Régulation télésuivie**

Les installations photovoltaïques télésuivies, sont celles équipées d'une balise de télécontrol (émetteur électromagnétique) qui permet l'acquisition, le stockage temporaire et la transmission des mesures via satellite.

Dans la plus part de ces installations, les mesures sont effectuées toutes les trois heures, et transmises tout les jours, permettant ainsi la détection rapide des anomalies et l'intervention des installateurs dans les délais les plus courts possible.

A partir des mesures tri horaires, des bilans mensuels sont effectuées, ils permettent de visualiser rapidement les conditions d'utilisations et les modes de fonctionnement.

Le télécontrôle a pour avantage de faciliter la maintenance, et d'en réduire les coûts, en diminuant le nombre de visites systématiques. Il devient indispensable dans le cas des habitats isolés et ceux des montagnes, car celles-ci sont très difficiles d'accès en hiver, et les températures très basses enregistrées régulièrement, imposent une surveillance quasi-quotidienne des batteries. En effet, si celles-ci ne sont pas assez chargées, les risques de gel sont grands.

### **Conclusion**

La durée de vie maximale des meilleures batteries en usage photovoltaïque (environ de 10 ans) est très inférieure à celle des modules. Elle constitue donc un maillon faible dans les systèmes photovoltaïques. C'est pourquoi leurs définitions, leurs protections contre les surcharges et les décharges profondes et leur entretien doivent faire l'objet de soins attentif.

La régulation électronique est pratiquement toujours indispensable dans les systèmes solaires photovoltaïques avec batterie. La régulation de charge adaptée à base des régulateurs classiques tels : les régulateurs shunt et série ne permettent pas une bonne charge de la batterie, d'où l'utilisation des régulateurs MPT, ce qui rend leur conception plus rentable.

Un régulateur de charge, d'une durée de vie de 7 à 10 ans, qu'il soit de conception simple ou compliquée, constitue toujours le cœur d'une installation photovoltaïque. Le point de vue économique, veut que le montage satisfait les critères de simplicité, de fiabilité et de performance ; critères qui ne peuvent être réalisés simultanément.

**Introduction**

Connaissant le procédé de conversion photovoltaïque ainsi que les éléments constituant la centrale électrique d'origine photovoltaïque, on doit déterminer en fonction des sollicitations telle que l'ensoleillement et le profil de charge, l'ensemble des éléments de la chaîne photovoltaïque.

Ce chapitre aura pour but de présenter les étapes de dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome, ainsi que les méthodes de dimensionnement des installations photovoltaïques.

**III.1 Dimensionnement des installations photovoltaïques**

Le dimensionnement d'un générateur photovoltaïque a pour objectif, la détermination de la puissance crête des modules solaires et la capacité de la batterie associée à partir des données d'ensoleillement du site d'une part et des besoins électriques de l'utilisateur d'une autre part.

Cette détermination des différents éléments doit permettre de garantir une fourniture d'énergie électrique tout au long de l'année ou éventuellement sur une période déterminée.

Les données radio-métriques pour une région déterminée sont généralement disponibles mois par mois, et correspondent à l'irradiation quotidienne moyenne sur un plan horizontal.

Les données sont généralement exprimées en  $Kw/m^2$  et les valeurs de l'ensoleillement sont données à la latitude du lieu considéré, et dépendent aussi de ses conditions climatiques.

Pour déterminer l'énergie quotidienne (journalière) moyenne incidente sur le plan des modules, on effectue un calcul à partir des données de l'ensoleillement sur le plan horizontal et de l'inclinaison donnée aux modules.

L'inclinaison optimale est fixée par le dimensionnement qui prend directement en compte la capacité correspondante des batteries de stockage.

**III.1.1 Les principales Règles de dimensionnement**

On n'utilise le générateur photovoltaïque que pour des applications spécifiques de production d'électricité telles que : l'éclairage, les télétransmissions, le pompage...etc.

Rejeter les applications thermiques de l'électricité (chauffage et cuisson).

Choisir des récepteurs à haut rendement.

Choisir les chaînes de puissances les plus courtes (éviter si possible les onduleurs).

### **III.1.2 Les étapes de dimensionnement d'un système photovoltaïque**

Dimensionner une installation photovoltaïque consiste à déterminer les caractéristiques de l'installation, cela passe par :

- Une identification précise des besoins en électricité de l'utilisateur.
- Une connaissance des ressources solaires locales (énergie solaire disponible du site par unité de surface).
- Un calcul du nombre et la surface des modules photovoltaïques en fonction des ressources solaires répondant aux besoins de l'utilisateur.
- Une recherche des caractéristiques des autres composants de l'installation solaire (capacité des batteries, section des câbles, puissance de l'onduleur,..).
- Une consultation des fournisseurs pour une estimation de l'investissement à considérer.

Un bon choix de matériel, associé à un dimensionnement approprié garantissant le bon fonctionnement de l'installation, sa durée de vie et la rentabilité de l'investissement.

### **III.1.3 Méthodes simples de dimensionnement**

Dans ces méthodes sont regroupées celles pour lesquelles le calcul de la taille du générateur et du stockage peut être effectué de manière manuelle. Les étapes suivantes permettront de dimensionner approximativement un système photovoltaïque.

#### **III.1.3.1 La méthode simplifiée [3]**

Cette méthode nécessite la connaissance de la valeur d'irradiation solaire globale moyenne quotidienne du mois le moins ensoleillé de l'année (mois le plus défavorable, généralement décembre). On calculera l'énergie consommée par les divers équipements «  $C_j$  ».

Ensuite on pourra calculer la puissance crête du module  $P_c$ , ainsi le nombre de modules nécessaire est obtenu par un simple calcul on connaissant la puissance crête d'un seul module  $P_{cm}$ .

La détermination du parc batterie est réalisée à partir de la prise en compte d'un certain nombre de jours d'autonomie  $N_j$  à assurer une production nulle qui doit être compris entre 4 et 10 jours, en plus on doit disposer de la valeur de la tension de travail  $U$  qui est aussi nécessaire.

**a. Dimensionnement du champ photovoltaïque**

• **Evaluation de l'énergie moyenne journalière requise par la charge**

La consommation moyenne quotidienne nécessaire pour le fonctionnement des équipements en ( $Wh/j$ ) est donnée par la formule suivante :

$$C_j = \sum P \times h \dots\dots\dots(9)$$

Avec :

- $P$  : La puissance électrique consommée par la charge (en W) ;
- $h$  : La durée d'utilisation quotidienne moyenne (en h).

• **Estimation de la puissance crête nécessaire**

La puissance crête des modules  $P_c$  est donnée par sa formule :

$$P_c = \frac{C_j}{K} \times E \dots\dots\dots(10)$$

Où :

$E$  : Le rayonnement solaire global journalier minimal reçu sur le plan des modules (en  $kW/m^2 / j$ ) ;

$K$  : Facteur tenant compte des diverses considérations qui affectent le rendement de l'installation, en général il est égal à 0,56.

• **Calcul du nombre de modules nécessaires**

Le nombre de modules nécessaire à installer est :

$$N_m = \frac{P_c}{P_{cm}} \dots\dots\dots(11)$$

Avec :

$P_{cm}$  : La puissance crête correspondant à un module.

**b. Dimensionnement de la batterie de stockage**

• **Choix de la tension de travail du système**

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

- Pour  $P_c < 150 W_c$  implique  $U = 12V$
- Pour  $150 W_c < P_c < 1000 W_c$  implique  $U = 24V$  [3]
- Pour  $P_c > 1000 W_c$  implique  $U = 48V$

- **Estimation de la capacité de stockage :**

La capacité utile de la batterie en ( Ah ) est :

$$C_u = \frac{C_j \times N_j}{U} \dots\dots\dots(12)$$

Avec :

$$C = C_j \times N_j \text{ (Wh)};$$

$N_j$  : Le nombre de jours d'autonomie du système ;

$U$  : La tension de travail de l'installation.

- **Optimisation des calculs en agissant sur le générateur**

Sachant que la puissance crête du générateur définit pratiquement le coût de l'installation et pour se confronter à un budget donné, on est amené à diminuer la puissance crête  $P_c$ .

La diminution de la puissance crête se répercute en choisissant une puissance crête  $P'_c$ .

On calcul par la suite le nombre de modules  $N'$  avec la nouvelle puissance crête, ainsi que la capacité de la batterie  $C'$  en Wh par l'expression suivante:

$$C' = 6 \times P'_c \times E_{max} \dots\dots\dots(13)$$

**c. Application pour la méthode**

Pour cette méthode on a pris le cas d'une installation à éclairage, qui comporte une lampe à incandescence de 90W fonctionnant 2h par jour, et 3 lampes de 40W qui s'allume 5h en moyenne chaque jour, on veut avoir une autonomie de 10 jours du système.

On a choisit des modules Multicristallin (50W) chacun, ces caractéristique physiques et électriques sont données dans l'annexe A.

- Pour cet exemple on donne :

$E_{min} = 6.502 \text{ kW} / \text{m}^2 / \text{j}$  ; le rayonnement solaire globale journalier minimal reçu sur le plan des modules du site.

$E_{max} = 8.322(\text{kW} / \text{m}^2/\text{j})$  ; le rayonnement solaire globale journalière maximal.

### **Dimensionnement du champ photovoltaïque**

Le calcul de l'énergie moyenne journalière consommée par les divers équipements :

$$C_j = 90 \times 2 + 3 \times 40 \times 5 = 780 \text{ Wh/j}$$

La puissance crête du générateur photovoltaïque est :

$$P_c = \frac{780}{0.56 \times 6.502} = 214.22 \text{ Wc}$$

Le nombre de modules est alors :

$$N_m = \frac{214.22}{50} = 4.28 \Rightarrow 5 \text{ module}$$

### **Dimensionnement de la batterie de stockage**

Choix de la tension de travail :

$$U = 24 \text{ V}$$

La capacité de stockage :

$$C_u = 780 \times \frac{10}{25} = 325 \text{ Ah}$$

### **Optimisation des calculs (stockage)**

On choisit :

$$P'_c = 0.8 \times P_c \Rightarrow P'_c = 171.38 \text{ Wc}$$

Le nouveau nombre de modules nécessaire sera :

$$N'_m = \frac{171.38}{50} = 3.42 \approx 4 \text{ module}$$

La tension de travail du système  $U' = 24 \text{ V}$ , la capacité est :

$$C' = 6 \times 171.38 \times 8.32 \text{ Wh}$$

Donc la nouvelle valeur de la capacité utile sera :

$$C'_u = \frac{8557.14}{24} = 356.55 \text{ Ah}$$

Note :

Pour cette charge de 780 Wh/j; on a trouvé qu'il faut installer 4 modules de 50 W chacun, avec une capacité de 360 Ah.

### **d. Estimation du coût [12, 13]**

Le tableau III.1 présente le nombre et le coût des éléments constituant ce système. On a choisissant des batteries de 12V/100Ah, on trouve que leurs nombre est égale à 4.

	<b>Prix d'unité €</b>	<b>Nombre utilisé</b>	<b>Coût €</b>
<b>Module</b>	399	4	1595
<b>Batterie</b>	330	4	1320
<b>Total</b>			2915

*Tableau III.1: Estimation du coût de la première installation*

### **III.1.3.2 La méthode généralisée [3]**

Cette deuxième méthode a pour but de déterminer la puissance crête du générateur solaire et la capacité de la batterie, à partir des données d'ensoleillement du site d'une part, et des besoins électriques de l'utilisateur d'autre part.

Le choix des composantes du système solaire doit permettre à l'utilisateur d'utiliser des équipements requis durant la période demandée (c'est-à-dire tout au long de l'année ou pour une période déterminée), et ce avec une disponibilité prédéterminée.

Les étapes suivantes permettront de dimensionner approximativement un système photovoltaïque. Il faut en premier lieu estimer les besoins en électricité et établir la durée de la période d'ensoleillement de la région où le système sera installé ; une fois le gisement du site est effectué, il nous reste à choisir les éléments constituant le système photovoltaïque (module, régulateur de charge de batterie, onduleur).

Les formules de calcul ci-après permettront ensuite de dimensionner la puissance du champ photovoltaïque et la capacité de la batterie.

La détermination du parc batterie est réalisée à partir de la prise en compte d'un certain nombre de jours d'autonomie à assurer à production nulle. Ce nombre de jours varie suivant les auteurs mais également suivant les applications et la situation géographique (entre 3 jours et 3 semaines).

#### **a. dimensionnement du champ photovoltaïque PV**

- **Evaluation de l'énergie journalière fournie par un module**

Sous les conditions standard de température et de l'éclairement ( $T=25^{\circ}$  et  $G=1000$ ).

L'énergie délivrée par un module est exprimée sous la forme suivante :

$$E_p = P_{cm} \times \left( \frac{E_{\min}}{G_{cs}} \right) \times K \dots\dots\dots(14)$$

Où :

$P_{cm}$  : Puissance du module exprimée (en annuelle W);

$E_{\min}$  : Irradiation moyenne journalière annuelle minimale en (Wh / m<sup>2</sup>) ;

$K$  : Facteur de correction global, contenant les divers rendements ainsi qu'un coefficient de sécurité; il est exprimé en (%);

$G_{cs}$  : Coefficient constant; il est égal à 1000

• **Estimation du nombre total de modules constituant le générateur :**

Le nombre total de module à installer est donné par :

$$N = \frac{C_j}{R_0 \times R_r} \times \frac{1}{E_p} \dots\dots\dots(15)$$

Avec :

$R_0$  : Rendement de l'onduleur en (%);

$R_r$  : Rendement du régulateur en (%);

$C_j$  : Énergie journalière consommée par la charge en (Wh).

• **Estimation du nombre de module en série**

Le nombre de module en série est :

$$N_s = \frac{U}{U_n} \dots\dots\dots(16)$$

Avec :

$U$  : Tension d'installation en V ;

$U_n$  : Tension nominale d'un module en V .

• **Estimation du nombre de branche en parallèle**

$$N_p = \frac{N}{N_s} \dots\dots\dots(17)$$

$N_p$  : Nombre de module en parallèle.

• **Calcul de la puissance du générateur**

La puissance crête délivrée par le générateur ( $W_c$ ) est :

$$P_c = N_s \times N_p \times P_{cm} \dots\dots\dots(18)$$

• **Calcul de la surface totale du générateur**

La surface totale occupée par le champ sur le sol ou le toi est :

$$S_t = N \times S_m \dots\dots\dots(19)$$

$S_m$  : C'est la surface d'un module en  $m^2$

**b. Dimensionnement de la batterie de stockage**

➤ **Détermination de la capacité de stockage**

La capacité de stockage en (Wh) est donnée par :

$$C = \frac{C_j \times N_j}{P_f \times R_b} \dots\dots\dots(20)$$

Avec :

$N_j$  : Autonomie en jours;

$P_f$  : Profondeur de décharge en %;

$R_b$  : Rendement de la batterie en %;

➤ **Détermination de la capacité utile de stockage**

Elle s'exprime par :

$$C_u = \frac{C}{U} \dots\dots\dots(21)$$

**Détermination du nombre d'élément batterie en série**

On donne le nombre d'élément batterie en série par la relation :

$$N_{bs} = \frac{U}{U_b} \dots\dots\dots(22)$$

$U_b$  : Tension de l'élément batterie donnée par le constructeur en V .

➤ **Détermination du nombre de branche d'élément en parallèle**

Le nombre de branche d'élément en parallèle :

$$N_{bp} = \frac{C_u}{C_e} \dots\dots\dots(23)$$

$C_e$  : Capacité d'un élément batterie donnée par le constructeur exprimée en (Ah) .

➤ **Détermination du nombre total d'élément batterie**

Le nombre total d'élément batterie est donné par :

$$N_b = N_{bp} \times N_{bs} \dots\dots\dots (24)$$

**c. Application pour la méthode :**

Considérons une station d'éclairage travaillant sous 96 V et consommant 11 KWh/j, cette station est implémentée dans une certaine région. Dans cet exemple on tient en compte du rendement du régulateur et de l'onduleur.

On donne :

$$P_{cm} = 43 W ; K = 0,50 ; R_0 = 93\% ; R_r = 93\% ; U = 96V ; U_n = 12V ; S_m = 0,4m^2$$

$$N_j = 5 \text{ jours} ; P_f = 50\% ; R_b = 97\% ; U_b = 2V .$$

• **Caractéristique électrique du module : [13]**

Puissance maximale: 43 W

Tension maximale : 16,5 V

Courant maximum : 2,4 A

Tension circuit-ouvert : 21V

Courant court-circuit : 2,7

• **Caractéristique physique du module 43 W: [13]**

Poids : 12Kg

Dimensions : 1605 × 660 × 35

Nombres de cellules : 36

**1. Dimensionnement du champ photovoltaïque :**

Energie journalière fournie par un module :

$$E_p = \frac{43 \times 5.890}{1000 \times 0.50} = 126.635 Wh$$

Le nombre total de module constituant le générateur :

$$N = \frac{11000}{0.93^2} \times \frac{1}{126.64} = 101 \text{ module}$$

Le nombre de module en série :

$$N_s = \frac{96}{12} = 8 \text{ module}$$

Le nombre de branche en parallèle :

$$N_p = \frac{101}{8} = 12.60 \approx 13 \text{ branche}$$

La puissance du générateur :

$$P_c = 8 \times 13 \times 43 = 4472 Wc$$

La surface totale du générateur :

$$S_t = 101 \times 0.4 = 40.4 m^2$$

## 2. Dimensionnement de la batterie :

La capacité de stockage sera de :

$$C = \frac{11000 \times 5}{0.5 \times 0.97} = 113402 Wh$$

La capacité utile de stockage :

$$C_u = \frac{113402.06}{96} = 1181.27 Ah$$

Le nombre d'élément batterie en série :

$$N_{bs} = \frac{96}{2} = 48 \text{élément}$$

Le nombre de branche d'élément en parallèle est alors de :

$$N_{bp} = \frac{1181.27}{2000} = 0.59 \approx 1 \text{branche}$$

Et le nombre total d'élément batterie :

$$N_b = 48 \times 1 = 48 \text{élément}$$

### d. Estimation du coût [12,13]

Le tableau III.2 représente le nombre et le coût des éléments constituant ce système :

On a utilisé dans cet exemple on a utilisé des batterie 12V / 200 Ah

	Prix d'unité €	Nombre utilisé	Coût €
<b>Module</b>	399	101	40299
<b>Batterie</b>	485	48	23280
<b>Total</b>			63579

**Tableau III.2: Estimation du cout de la deuxième installation**

#### Remarque :

Après avoir étudié ces deux méthodes et d'avoir estimé le coût, on constate que la première est plus simple mais moins détaillée par rapport à la deuxième qui donne plus de précisions et d'informations, par contre le coût augmente selon la demande énergétique, en effet plus la consommation est élevée plus le nombre de modules à utiliser augmente et ainsi la capacité de stockage.

**III.1.3.3 Optimisation des calculs en agissant sur le stockage :**

Le principe de calcul présenté précédemment détermine un générateur (puissance crête, capacité batterie) satisfaisant certains critères techniques. Toutefois, l'analyse des coûts actuels montre qu'il est judicieux de réduire la capacité batterie (éléments aux coûts non négligeables). Pour cela plusieurs solutions sont possibles pour diminuer l'importance du stockage qui sont :

- **L'autonomie :**

Pour diminuer la capacité de la batterie, on peut accepter d'avoir un moindre degré d'autonomie, lorsque la charge peut rester inopérante durant les quelques jours les plus difficiles de la période de fonctionnement prévue, ou lorsqu'il est possible de diminuer la demande durant ces moments critiques, la demande sur la batterie d'accumulateurs sera moindre et on pourra choisir une capacité plus petite.

- **Le nombre de modules :**

Pour diminuer la capacité de la batterie, une solution consiste à augmenter le nombre de modules par rapport à celui déterminé précédemment (calcul du générateur).

- **L'orientation**

La position des modules photovoltaïque par rapport au soleil influe directement sur leur production énergétique, il est très important de bien les placer pour les utiliser au maximum de leurs capacités.

- **L'inclinaison des modules**

Il est possible d'augmenter la production d'énergie du générateur solaire durant les mois les plus déficitaires en inclinant davantage le champ de modules afin qu'à cette période le rayonnement soit perpendiculaire aux modules. Ceci permettra de diminuer le nombre requis de modules et la capacité de stockage des accumulateurs.



## **Introduction**

Dans ce chapitre on va dimensionner un système photovoltaïque autonome, en prenant comme cas la *Faculté Génie Électrique* de l'université *Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*. Considérons que cette installation n'assure que l'éclairage et l'alimentation des micro-ordinateurs.

### **IV.1 Définition du site :**

Le site d'implantation du système photovoltaïque se situe dans la *Wilaya* de *Tizi-Ouzou* et précisément au lieu dit *Bastos*, ce site porte le nom « *Hasnaoua II* ».

La ville de Tizi-Ouzou est située à 100Km d'Alger, ces deux ville sont à une différence d'altitude de 1°, les caractéristiques climatiques sont pratiquement les mêmes, alors on peut supposer que les valeurs d'irradiation solaire pour la région d'Alger seront valables pour notre site.

#### **IV1.1 localisation du site**

Wilaya : *TIZI- OUZOU*

Site : *Hasnaoua II*

Latitude : 36°42 min

Longitude : 4°08 min est

Altitude : 153,40 mètres

Albédo : 0,2

Température ambiante min : +5°, Température ambiante max : +40°C

#### **IV.2 Evaluation des besoins**

Sachant que cette installation photovoltaïque assure l'éclairage et l'alimentation des microordinateurs; pour l'évaluation de leurs consommations, il faut d'abord calculer le nombre de salles, d'amphithéâtres, de bureaux (enseignants + fonctionnaires), de laboratoires (*ETH + ELN + AUTO*) et enfin le nombre de micro-ordinateurs sans le département informatique.

Sachant que chaque néant consomme 40W et que chaque micro-ordinateur consomme 300W. Le calcul de leurs consommations instantanées (puissance électrique consommée), ainsi que la consommation moyenne quotidienne (l'énergie moyenne journalière) sont alors illustrées dans les deux tableaux suivants :

**Chapitre IV Dimensionnement du système Photovoltaïque pour la Faculté  
Génie Electrique**

	<i>Nombre</i>	<i>Nombre de lampes dans chaque pièce</i>	<i>Nombre total des néants</i>	<i>Puissance consommée (W)</i>
<i>Salle pédagogique</i>	33	16	528	21120
<i>Amphithéâtre</i>	06	90	540	21600
<i>Bureau (petit + grand)</i>	46 +10	12+18	372	14880
<i>Laboratoire ( <math>E_{th} + E_{ln} + Auto</math>)</i>	48	36	1728	69120
<i>Couloir</i>	4	186	744	29760
			<b>Total</b>	<b>156480</b>

**Tableau VI.1 : La puissance électrique total consommée par les néants.**

- Sachant que le nombre total de micro est de 209.

<b>Elément de la charge</b>	<b>Consommation (W)</b>
<i>Micro-ordinateur</i>	62700
<i>Néants</i>	156480
<b>Total</b>	219180

**Tableau VI.2: La puissance électrique total consommée par la charge.**

Le tableau en dessous présente l'énergie moyenne journalière requise par la charge ( $C_j$ ) :

<i>La charge</i>	<i>Puissance consommée (W)</i>	<i>Durée moyenne d'utilisation (h)</i>	<i>Energie moyenne journalière (Wh/j)</i>
<i>Salle pédagogiques</i>	21120	5	105600
<i>Amphithéâtres</i>	21600	6	129600
<i>Bureaux</i>	14880	5	74400
<i>Laboratoires</i>	69120	5	345600
<i>Couloirs</i>	29760	6	178560
<i>Micro</i>	62700	5	313500
			<b>Total = 1147260</b>

**Tableau VI.3 : l'énergie moyenne journalière requise par la charge**

### IV.3 Caractéristiques du système

On peut donc résumer les caractéristiques de notre charge par :

- La puissance consommée : 219180 W.
- Energie moyenne consommée : 1147260.  $h$  .
- Durée d'utilisation journalière : 5 \_ 6 heures.
- L'autonomie du système : 7 jours.

### IV.4 dimensionnement du générateur

Le générateur sera formé de modules de 100W<sub>c</sub> /12V, multicristallin et fabriqué par l'entreprise espagnole « *ISOFOTON* ».

#### IV.4.1 Caractéristiques du module AP 100/1006 [12]

Le module AP100 est normalisé par « *CE ISO 9000* » qui garantie sa qualité.

- **Caractéristiques électriques du module AP 100/1006 :**

Puissance maximale : 100 W

Tension maximale : 36,5 V

Courant maximum : 2,59 A

Tension de circuit-ouvert : 42,5 V

Courant de court-circuit : 3,14 A

Tension nominale : 12 V

- **Caractéristiques physiques du module AP 100/ 1006 :**

Poids : 10 Kg

Taille : 985× 750 × 30 (mm<sup>2</sup>)

Garantie : 25 ans

Efficacité : 80%

#### IV.4.2 calcul de la puissance crête du générateur photovoltaïque

Après avoir estimé l'énergie journalière consommée par la charge (C<sub>j</sub>), On peut calculer la puissance crête du générateur qui est donné par la formule suivante :

$$= \frac{\quad}{\times}$$

Avec : C<sub>j</sub> : La consommation moyenne quotidienne

E : Le rayonnement solaire global journalier minimal reçu sur le plan des modules

K : Facteur tenant compte des diverses considérations qui affecte le rendement de l'installation

Donc on trouve que = 315084,37

**IV.4.3 Calcul du nombre de modules**

Le nombre total de module du générateur est :

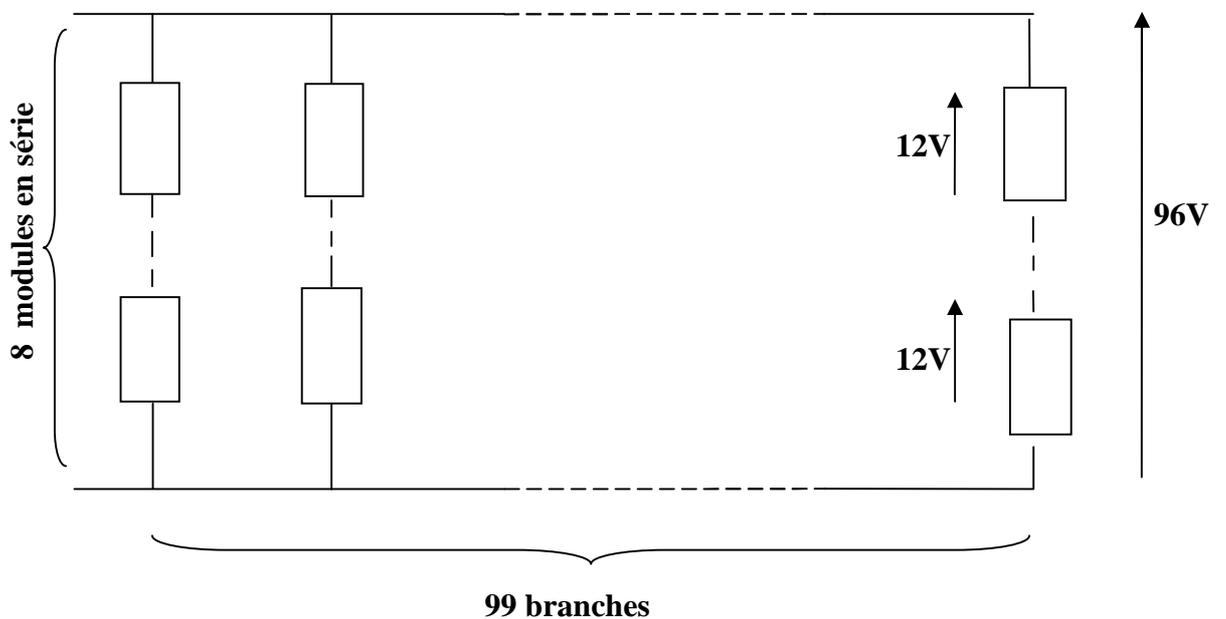
$$N_m = \frac{P_c}{P_{cm}} = \frac{3150,8437}{1} = 3150,8437 \approx 3152 \text{ modules.}$$

**IV.4.4 Répartition des modules du générateur**

On dispose d'une centrale qui est constituée de 4 champs de 788 modules chacun et qui sont répartis comme suit :

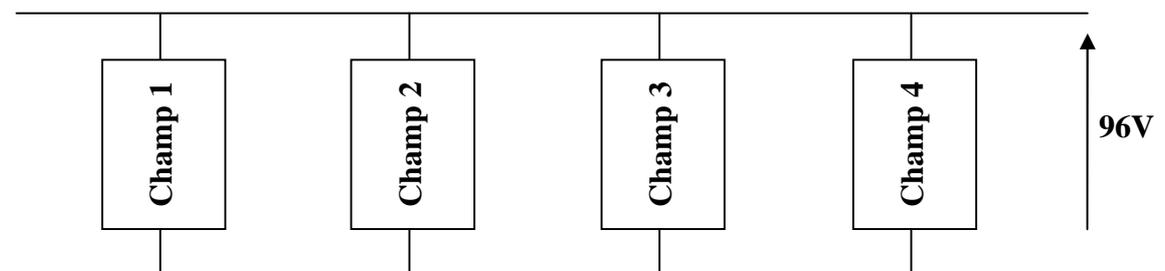
- Le nombre de branche parallèle est de 99.
- Chaque branche aura 8 modules en série.

On peut schématiser cette répartition des modules de chaque champ par la figure IV.1 :



*Figure IV.1 : Association des modules dans chaque champ.*

- ❖ Les quatre champs du générateur sont assemblés en parallèle cela afin d'éviter les courants trop forts



*Figure IV.2 : Association des 4 champs de la centrale*

#### **IV.4.5 Caractéristiques du générateur photovoltaïque**

- **La puissance crête d'un champ**

La puissance délivrée par chaque champ est donnée par:

$$\begin{aligned} &= \quad \times \quad \times \\ &= 99 \times 8 \times 100 = 79200 \quad . \\ &= \mathbf{79200} \quad . \end{aligned}$$

- **La surface occupée par le générateur et son emplacement**

La surface qu'occupe le module AP100 est égale à 0,74 m<sup>2</sup>, on aura donc :

$$= \mathbf{583,12} \quad ; \quad = \mathbf{2332,48} \quad .$$

Il a été décidé de placer le générateur sur la terrasse de la faculté. Sachant que la surface occupée par le générateur étant de 2332,48 m<sup>2</sup>, pour le placer, il faudra donc avoir suffisamment d'espace.

La superficie de la toiture étant de 6443,05 m<sup>2</sup> (l'annexe B), donc elle convient à notre installation.

#### **IV. 4.5 Choix de l'orientation et l'inclinaison des modules photovoltaïques**

Puisque la latitude du site est de 36°42' et l'utilisation est annuelle, l'inclinaison optimale sera de 36° + 10° (selon le tableau I.1), et comme on est dans l'hémisphère nord l'orientation des modules sera vers le sud .

#### **IV.5 Dimensionnement de la batterie de stockage d'un champ :**

##### **IV.5.1. Choix des batteries et leurs capacités**

Dans cette étude, on a choisi des accumulateurs aux plomb car ils représentent des avantages par rapport aux autres accumulateurs qu'on peut résumer :

- Le bon rapport qualité / prix ;
- L'entretien faible ou nul ;
- La bonne tenue aux températures externe ;
- Le rendement supérieur à 90%.

Néanmoins pour assurer leur durée de vie. Quelques précautions sont nécessaires :

- Eviter les décharges profondes et les surcharges ;
- Maintenir les batteries chargées quand on les stocke.

Pour calculer la capacité de stockage des batteries, on considère le mois le plus défavorable, c'est-à-dire la déviation maximale d'irradiation solaire enregistrée à fin d'éviter au maximum les défaillances du système, (Le mois considérée est le mois de décembre car en ce mois il n'y a pratiquement pas de soleil à cause des mauvais temps).

#### **IV.5.2 .Calcul de la capacité utile**

$$= \times$$

$$788 \text{ panneaux} \rightarrow 1147260 \text{ h .}$$

$$198 \text{ panneaux} \rightarrow 288270,91 \text{ h .}$$

Donc l'énergie journalière moyenne fournie par chaque champ est de 288270,91 h .

Après calcul on trouve que : = 21020 Ah

#### **IV.5.3 Le nombre de batterie à utiliser**

Sachant que pour un système d'une puissance assez importante, il est préférable de choisir le plus souvent des batteries de 24V au lieu de 12V standard, cela pour éviter les courants trop forts.

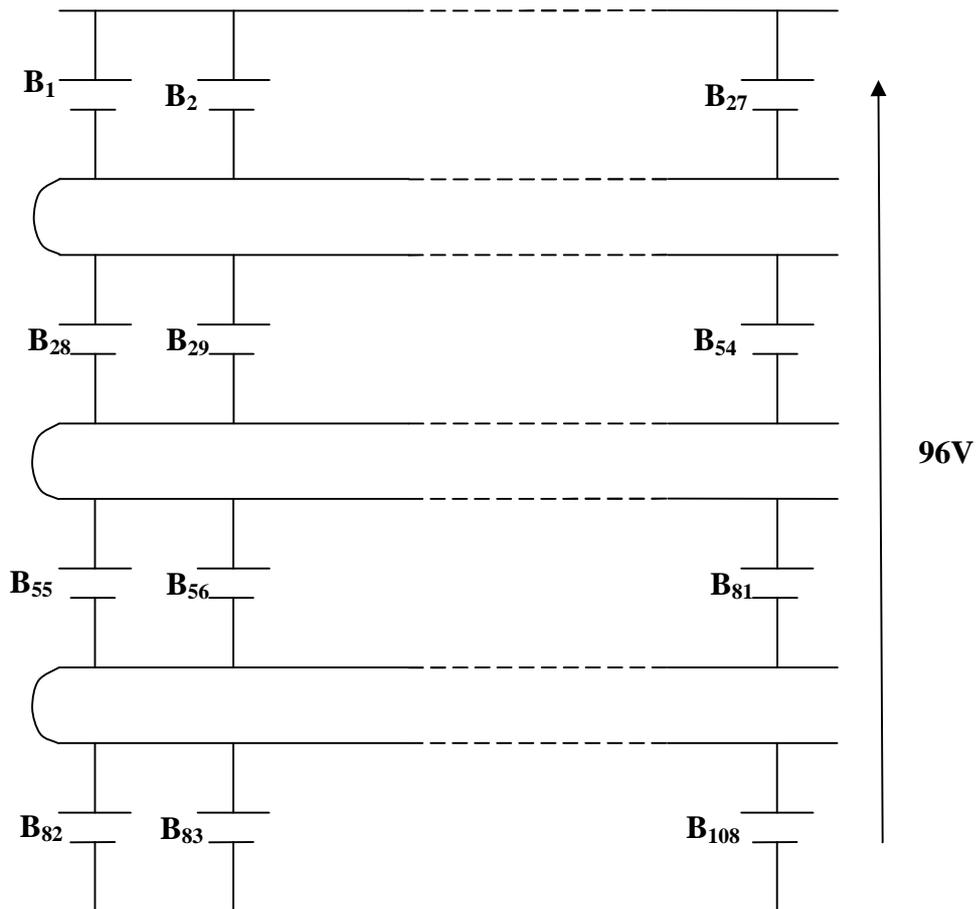
Pour cela on a choisit des batteries de plomb de 24V et de capacité de 200 Ah chacune, et comme on a besoin de 21020 Ah, donc le nombre total de batteries nécessaire pour le stockage de l'énergie est :  $21020 / 200 = 105,09 \approx 106$  batterie.

#### **IV.5.4. la répartition des batteries**

En associant les 106 batteries en série-parallel telque: la mise en série nous permet de multiplier les tensions, et la mise en parallel pour augmenter la capacité.

Dans notre cas :

Les batteries sont répartir en 4 blocs, placés en série et chacun a 24V à ces bornes et 27 batteries en série et cela est montré dans la figure suivante:



**Figure IV.3 : Association des blocs batteries (Série – Parallèle)**

Pour retrouver le nombre d’ampères-heures (la capacité de stockage de la batterie) dont on a besoin, on peut le calculer en utilisant les valeurs trouvées en dessus ; en effet :

La capacité de stockage =  $27 \times 4 \times 200 = 21600 \text{ Ah}$ .

**IV.5.5. Calcul de l’énergie stockée dans les batteries**

$$C = \quad \times$$

$$C = 288270,91 \times 7$$

$$C = 2017896,37 \text{ Wh.}$$

$$C_1 = C \times 4 = 8071585,48 \text{ Wh.}$$

L’énergie stockée dans les batteries est alors de  $8071585,48 \text{ Wh}$  et le besoin journalier est de  $1147260 \text{ h}$  , hors l’énergie nécessaire dont on a besoin est de  $1147260 \times 7$  qui est égale à  $8030820 \text{ Wh}$  ; de cela on peut déduire que l’on peut assurer une autonomie de 7 jours.

#### **IV.6 Choix du régulateur**

La régulation de charge sera dimensionnée pour une installation sous une tension de charge de 96V et un courant  $I = \frac{P}{U} = \frac{79200}{96} = 825A$ .

Vu l'indisponibilité dans le marché des régulateurs qui supportent ce courant, on propose alors d'utiliser trois régulateurs en parallèle pour chaque bloc de batterie, tel que chaque régulateur a ces caractéristiques techniques suivantes:

- Courant de sortie à 50°C : 100 A.
- Température ambiante admissible : 5°C-45°
- Affichage : courant et tension.
- Tension de charge : 24 V.
- Durée de vie : 15 ans.

#### **IV.7 choix de l'onduleur**

Le choix de l'onduleur à utiliser sera fait selon ses caractéristiques, qui convient à alimenter l'installation considérée :

Dans notre cas on a :

La tension d'entrée qui correspond à la tension du système mis en place ( $U = 96 V$ ) et à la demande d'électricité  $D = 219200 W > 5 Kw$ .

La tension de sortie : elle doit correspondre à la tension d'alimentation de CA des charges utilisées, notre installation à besoin de 220/230 VAC pour son fonctionnement normal.

En prenant en compte ces deux dernières caractéristiques et en se référant au tableau I.4, l'onduleur qui convient est « *INGECON* » du fabricant espagnol « *INGETEAM* » qui a les caractéristiques suivantes :

- **Electriques**
  - Distorsion harmonique (HTD) < 5%
  - Tension de sortie  $\pm 5\%$  : 220 a 230 V
  - Puissance nominale : 2500W
  - Puissance maximale : 5000W
  - Fréquence : 50 Hz
  - Rendement : 94%
- **Physiques**
  - Dimensions : 385 × 190 × 100mm
  - Poids : 5000 g

## Chapitre IV Dimensionnement du système Photovoltaïque pour la Faculté Génie Electrique

De cela, le nombre total d'onduleurs à utiliser est égal à 64.

### IV.8 Estimation du coût

Composant	Prix d'unité €	Nombre utilisé	cout €
Module	500	3152	1576000
Régulateur	240	48	11520
Batterie	115	424	48760
Onduleur	459,95	64	29436,8
<b>Total</b>			<b>1665716,8</b>

*Tableau IV.4. Estimation du coût de la faculté génie électrique.*

On remarque, que le coût d'un système photovoltaïque dépend de différents facteurs : coût du générateur, du stockage d'énergie, de la régulation électronique...etc.

Vu l'importance de la consommation de l'installation, donc le nombre d'éléments la constituant (module-batterie...) est assez élevé ce qui implique que le l'installation est couteuse

### IV.9. Étude comparative

Après avoir estimé le cout de l'installation photovoltaïques, on va la comparer avec celle donnée par SONELGAZ ; comme montre le tableau IV.5 suivant:

Coût de l'installation photovoltaïque	Coût de l'installation par SONELGAZ
<b>166571680</b>	<b>1769111,974</b>

*Tableau IV.5 : la comparaison des coûts (photovoltaïque, SONELGAZ)*

A partir de ce tableau, on peut dire que :

Le coût de cette installation photovoltaïque est beaucoup élevé par rapport au coût estimé par le réseau SONELGAZ.

Ce coût élevé, revient au nombre assez élevé d'éléments nécessaires au fonctionnement de cette installation.

En tenant en compte ces deux derniers critères, on constate que l'on est bénéficiaire avec le réseau SONELGAZ.

#### **IV.10 Choix de la diode de protection**

Pour choisir une diode de protection on doit prendre en considération deux paramètres essentiels :

- Le courant maximal direct supporté ;
- La tension inverse.

#### **IV.11 Câblage du système**

Pour assurer le bon fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome, il reste des derniers éléments à prendre en considération lors de la phase de son dimensionnement, il s'agit du câblage qui assure les liaisons entre les différents éléments de la centrale et leurs protections.

##### **IV.11.1 Propriétés des câbles**

Tout câble électrique a une résistance qui est donnée par la formule suivante :

$$R = \frac{\rho L}{S}$$

Avec :

L : La longueur du câble en m

S : La section du câble en mm<sup>2</sup>

$\rho$  : La résistivité du matériau conducteur en  $\mu\Omega.m$

Les pertes en tension et en courant se produisant lors du fonctionnement dans un câble reliant deux composants sont données respectivement : au produit de la résistance du câble par le courant qui le traverse ( $P = R \times I^2$ ), le rapport de la tension résistance

$$\left( \frac{U}{I} = R \right).$$

Il est donc important au vu de ces de bien choisir et de bien dimensionner la section des câbles électriques de façon à limiter la baisse de tension entre les composants (à moins de 5%) et les forts courants traversant ces câbles.

De manière générale, on peut résumer les liaisons existantes entre des divers composants dans un système avec batterie par :

- Liaison charge électrique-onduleur
- Liaison batterie-onduleur
- Liaison régulateur-batterie
- Liaison champ PV-batterie

Ils existent des abaques qui nous permettent de choisir le type de câbles basse tension assurant les liaisons entre les éléments de la centrale (voir l'annexe C).

#### **IV.11.2 Montage et câblage des modules**

- Tous les câbles d'interconnexions des modules entre eux sont à double isolation, flexibles et résistant à l'humidité, aux radiations UV et à l'eau.
- Les modules montés en série donne une branche de laquelle sort deux câbles de polarités inverses un positif et un négatif.
- Les câbles entre les quatre champs de modules ne sont pas pratiquement utilisés car ils passent dans un conduit.
- Le système de fixation lui même exposée aux intempéries doit pouvoir leurs résister, il sera donc nécessaire d'utiliser de la boulonnerie galvanisée.

#### **IV.11.3 La protection électrique**

Les protections électriques sont constituées de fusible, disjoncteurs, différentiel,...ext.

On utilise certains de ces protections pour les raisons suivantes :

- **Disjoncteur**

Il commande toute l'installation et sert à la mettre hors tension en cas de court-circuit, ou d'appel d'une puissance supérieure à celle de chaque branche de modules.

Ce disjoncteur peut être disjoncté manuellement : on peut le faire systématiquement avant toutes interventions sur notre installation.

IL existe aussi des dispositifs différentiels qui protègent encore plus efficacement l'installation en détectant la moindre fuite de courant.

- **Fusible**

Reliés à chacun des appareils, il protège l'installation en coupant le courant en cas d'échauffement ou de court-circuit.

Dans notre installation, nous utilisons des fusibles pour protéger la partie génératrice PV de la partie alternative.

Il sera également nécessaire de mettre à la terre les différentes parties de la centrale.

- **Mise à la terre**

Il sera également nécessaire de mettre à la terre les différentes parties de la centrale, et cela consiste à relier à une prise de terre, par un fil conducteur, les masses métalliques des équipements qui risquent d'être mises accidentellement en contact avec le courant.

D'une part la masse à la terre permet d'écouler les courants de fuite sans danger.

**Conclusion**

Le système photovoltaïque de grande puissance demande de disposer d'un nombre élevés d'éléments (modules, batteries et régulateurs ..... ) nécessaires pour son fonctionnement, le coût des ces derniers étant élevé, c'est pour cette raison que l'installation est très coûteuse.

## *Conclusion générale*

Le présent travail nous a permis d'étudier le principe de la génération directe de l'électricité à partir d'un rayonnement lumineux. Un système photovoltaïque passe d'abord par une démarche d'économie d'énergie, puis par une conception et une installation rigoureuse avec des composants qui répondent aux besoins de la charge à alimenter. L'exemple d'application sera : « l'éclairage et l'alimentation d'éléments informatique ».

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont vraiment les plus prometteurs pour la production d'énergie à cause de leurs possibilités d'autonomie assurées par les batteries, donc la régulation charge-décharge de ces éléments batterie est nécessaire, et cela pour prolonger leurs durée de vie, il est donc intéressant de disposer d'une très grandes bases de données pour les régulateurs et les batteries pour donner aux utilisateurs un vaste choix de leurs équipements.

Au long de cette étude, nous avons pu dimensionner l'installation électrique, pouvant être réalisée sur le site de la Faculté Génie électrique et Informatique, et nous avons constaté que l'installation d'une centrale photovoltaïque peut être possible du point de vu énergétique, mais il ne peut pas être intéressant d'un point de vu économique.

En effet, le prix de revient de notre installation qui présente une garantie de 15ans, plus rentable, par rapport à celui de l'énergie actuellement utilisée.

Le site d'implantation de l'installation, profite des forts ensoleillements, qui nous permet d'assurer la puissance recherchée.

Pour toutes ces raisons nous pouvons affirmer que la réalisation de cette installation assurant une charge de plusieurs Kilo-watt est d'un intérêt très bénéfique en terme d'autonomie car toute l'énergie captée sera récupérée pour être stockée, et non en terme d'économie car le coût de cette installation comportant un aussi grand nombre d'éléments (modules-batteries-onduleurs ainsi que leurs câblage) est exorbitant.

Ce travail nous a permis de se familiariser avec les méthodes de calcul et de dimensionnement d'une installation photovoltaïque avec toutes ses complexités.



## *Références bibliographiques*

- [1] *H.MEHIRES, M.SEKKAL* « mise en œuvre d'un ordinateur pour la caractérisation d'un générateur », projet de fin d'étude ENP 2007.
- [2] *F.BOUKHTOUCHE CHERFA* « Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT », thèse de magister ENP 2005.
- [3] *F.GAMA, K.MOUHAND OUSAID* « Système de régulation et de contrôle des installations photovoltaïques », mémoire de fin d'étude université BLIDA 2005.
- [4] *N.MEZIZENE, A. TATOULT, S.OUALI* « étude et dimensionnement d'un système autonome pour relais téléphonique *RB 2206 (mobilis)* », mémoire de fin d'étude *UMMTO* 2006.
- [5] *LARBANI SOFIANE, KARA SOFIANE* « Conception et réalisation d'un régulateur de charge / décharge d'une batterie (dans le domaine photovoltaïque) à base du *PIC 16F876A* avec afficheur *LCD* », mémoire de fin d'études *UMMTO* 2009.
- [6] *BOUGHIAS OUIZA, SABRI HAFIDHA* « Effets de la température sur les paramètres des cellules solaires à conversion photovoltaïque » mémoire de fin d'études *UMMTO* 2003.
- [7] *IDRISS HADJ MAHAMMED* « Modalisation du générateur photovoltaïque » thèse de magister en électronique *ENP*, 2002.
- [8] *LAMOUDI MOUHAMED YACINE, BADJ FAHIM NACER EDDINE* « Conception et réalisation d'une carte de caractérisation pour panneaux solaires » mémoire de fin d'études ENP, 2008.
- [9] *ANNE LABOURET, MICHEL VILLOZ* « Energie solaire photovoltaïque » ,deuxième édition, Paris 2003,2005.
- [10] *JEAN-CLAUDE MULLER* « Électricité photovoltaïque » , techniques d'ingénieurs *BE 8 578* , 2001.

[11] [www.energiepropre.net/savoirpv.htm](http://www.energiepropre.net/savoirpv.htm)

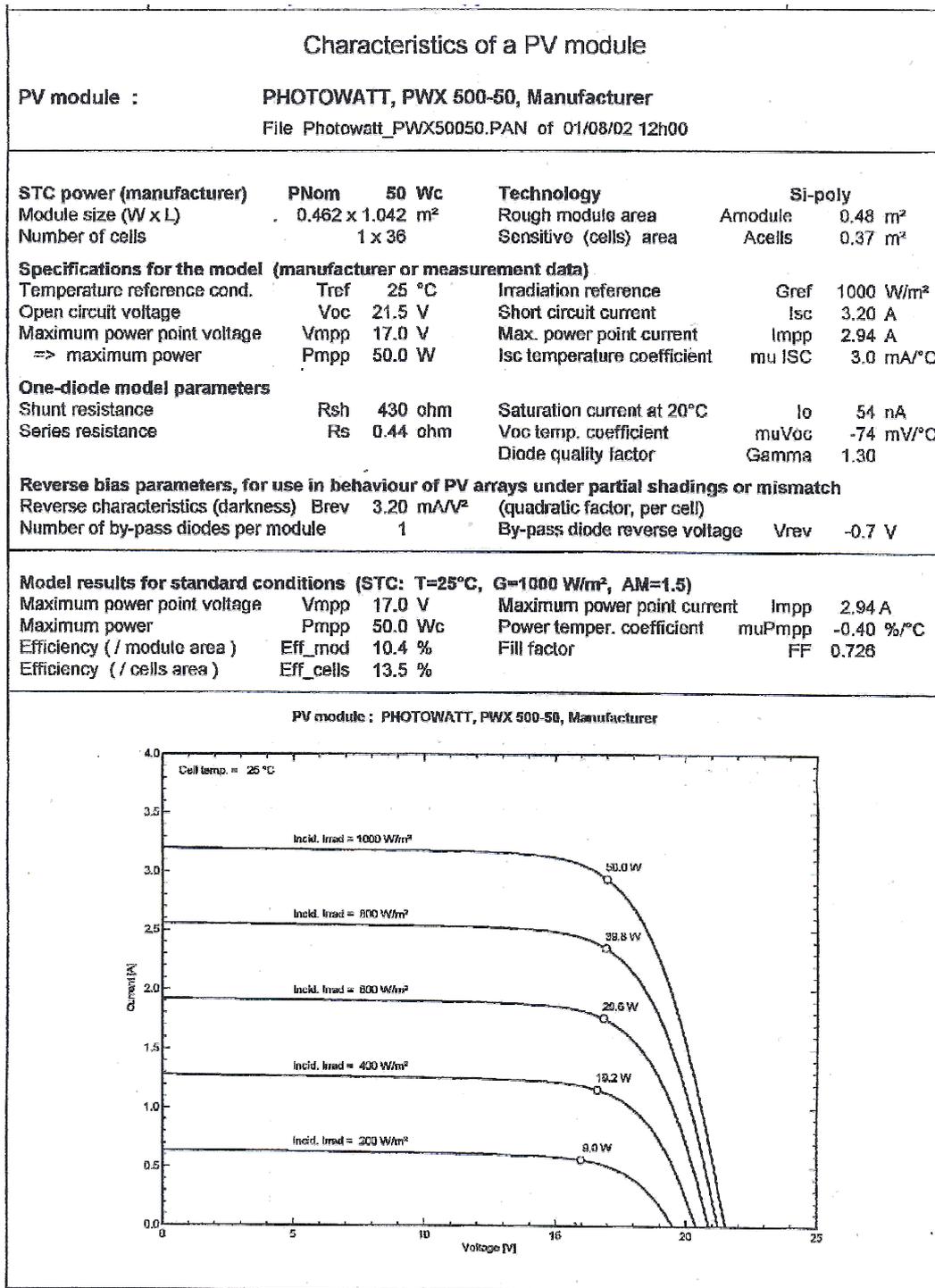
[12] [http://www.Accubel.be/.../photovoltaic...SF 130 2\\_fiche\\_technique\\_solarfabricaccubel\\_07\\_FR.pdf](http://www.Accubel.be/.../photovoltaic...SF 130 2_fiche_technique_solarfabricaccubel_07_FR.pdf)

[13] [http //www.Solarsud.com/index.phpmain\\_page=index&cpath=21\\_45](http://www.Solarsud.com/index.phpmain_page=index&cpath=21_45)

[14] <http://www.telink.fr/rs-03lcd-24-48.htm>

[15] [www.fndae.fr/archive/PDF/fndae12-b.pdf](http://www.fndae.fr/archive/PDF/fndae12-b.pdf)

## Annexe A



## ANNEXE B

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI  
TIZI OUZOU

SECRETARIAT GENERAL

### BORDEREAU DU PRIX UNITAIRE

#### LOT N° 03: FACULTÉ DU GÉNIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE

Désignation	Unité	Superficie	Prix Unitaire	Observations
Espaces à nettoyer :				
- Bibliothèques		1125		
- Amphithéâtres		1216		
- Laboratoires		7717		
- Salles de cours et salles de TD	M <sup>2</sup>	3184		
- Sanitaires		540		
- Conloirs.		4079		
- Bureaux		3325		
- Dépôt atelier.		2009		
► SUPERFICIE GLOBALE :			23195	