



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Akli Mohand Oulhadj (Bouira)

**Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Département de Génie Mécanique**

N° d'ordre :...../Master/2016.  
Série :...../GM/2016.

## **PROJET DE FIN D'ETUDES**

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master par :

**Akkouche Tinhinane**

**Azzaz Soumia**

**Spécialité : Mécanique Energétique**

## **THEME**

***Modélisation et dimensionnement d'un système  
de pompage photovoltaïque***

Soutenu le 09/06/2016 :

OUALLI.H	Professeur	Ecole Militaire. p	Président
ABERKANE. S	Maitre assistant	Université de Bouira	Membre
BOUREGBIL	Maitre assistant	Université de Bouira	Membre
DJELLAL.S	Maitre de Conférences	Université de Bouira	Rapporteur



# Remerciements

*En premier lieu, nous tenons à remercier notre Dieu tout puissant pour la santé, la volonté, le courage et la patience qui nous à donné la force pour accomplir ce travail.*

*Nous adressons nos vifs remerciements à notre promoteur consultant, Mr Djellal Slimane pour nos avoir dirigé tout au long de ce travail et pour ses explications, remarques judicieuses et conseils qui nous avons été précieuse pour la réalisation de ce travail grâce a son encouragement envers nous durant cette période.*

*Nous présentons nos chaleureux remerciements aux membres de jury qui ont consulté notre travail et aussi aux enseignants pour ces aides et orientation durant nos études. Et comme on n'oublie pas tout nos remerciements à Mr: Bounfouf .L pour toute ces informations.*

*Nos derniers remerciements et ce ne sont pas plus moindres, vont à tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.*

*Soumia et Tinhinane*





# Dédicace Dédicace

*En témoignage de ma reconnaissance pour leurs  
immenses sacrifices, mon Éducation et ma formation.*

*Je dédie ce Travail:*

*A ce qu'est toujours mon meilleur exemple dans la vie :*

*Mon Père pour les sacrifices qu'il a consentis pour mon  
Avenir et pour son soutien moral qu'il n'a cessé d'offrir ,  
ses encouragements continus*

*Avec un enorme plaisir, un cœur ouvert et une Immense joie,  
que je dédie mon travail à ma mère pour leurs dévouement,  
patience inconditionnels et leurs conseils toute au long de mes  
études.*

*A mes très chères sœurs Asmaa et Chaïmaa et mon beau frère  
Rabah sans oublier mon petit frère Youcef.*

*Mes grands parent, mes oncles et mes tantes surtout ma tante  
exceptionnelle Fadila sans oublier leurs enfants.*

*A toutes mes chères amies: Barkahom, Khadidja, Samia, Nouara,  
Asmaa et soumia Pour les moments que nous avons passé ensemble.*

*A toutes ces personnes que j'ai senti de leur dédier ce modeste  
travail avec mes vifs remerciements respectueuses de ma profonde  
gratitude*

*A ma copine binôme qui participé ce travail **TINHINANE.***

**SOUMIA**



# Dédicace

## Dédicace

*A mon père*

*Puis que rien au monde ne pourrait compenser les sacrifices qu'il a déployé pour guider mes pas, et ses encouragements continus, qui me motivent à entreprendre ce mémoire avec confiance en moi.*

*A ma mère*

*Pour son soutien, son amour et son sacrifice, nulle dédicace ne serait exprimer suffisamment ma gratitude, mon amour et mon profond respect dédiée à ma mère. Sa présence et ses encouragements sont pour moi les piliers de ce que je suis et de ce que fais.*

*A mes sœurs: SARAH, SOUMIA et mon frère YANIS. Sans oublier Syphax.*

*A mon cher mari SALAH pour son soutien moral qu'il n'a cessé d'offrir*

*A mes grands parents.*

*A mes oncles et tantes pour leurs conseils et a ma Belle famille : mes beaux parents, mes beaux frères dada SAID, HAMZA, AKLI et leurs femmes respectives HAYET, SOULEF et FATIMA et tous leurs enfants.*

*A tous mes formateurs pour leurs conseils et leurs collaborations*

*A toutes mes amies ASMAA, TINA. Pour les moments que nous avons passé ensemble. Veuillez trouver ici l'expression de ma profonde gratitude*

*A toute personne qui m'a aidée ou encouragée tout au long de mes études.*

*À ma copine binôme qui a participé à ce travail SOUMIA.*

**TINHINANE**

# Sommaire

# Sommaire

---

## Sommaire

Nomenclature

Liste des Figures et des Tableaux

Introduction Générale..... 2

### Chapitre I: Généralités sur l'énergie solaire

I.1 Introduction ..... 5

I.2 Le rayonnement solaire ..... 5

I.3 Spectre du rayonnement ..... 7

I.4 Modèles de coordonnées soleil..... 8

I.5 Le Potentiel Solaire en Algérie ..... 10

### Chapitre II : Etude des systèmes Photovoltaïques (PV)

II.1 Introduction..... 14

II.2 Historique..... 14

II.3 Le générateur photovoltaïque GPV ..... 16

II.3.1 Principe de fonctionnement..... 16

II.3.2 Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque) ..... 17

II.4 Constitution d'un générateur photovoltaïque..... 21

II.4.1 Les cellules solaires..... 21

II.4.2 Les modules..... 24

-Association des cellules photovoltaïques en série..... 25

-Association des cellules photovoltaïques en parallèle ..... 26

II.5 Les critères influant sur le rendement de module PV ..... 27

II.5.1 Critères atmosphériques ..... 27

a) L'éclairement (l'irradiation) ..... 27

b) La température de fonctionnement ..... 28

II.5.2 Critères non atmosphériques ..... 28

II.6 Classification des systèmes PV ..... 29

II.7 Avantages et Inconvénients de l'énergie PV ..... 30

# Sommaire

---

## Chapitre III : Système de Pompage Photovoltaïque

III.1 Introduction .....	32
III.2 Constitution d'un système de pompage PV .....	32
III.2.1 Générateur photovoltaïque .....	33
III.2.2 Convertisseur d'énergie .....	34
III.2.2.1 Le convertisseur DC/DC (hacheur).....	34
III.2.2.2 Le convertisseur DC/AC (onduleur).....	35
III.2.3 Le groupe motopompe.....	35
III.2.3.1 Le Moteur.....	36
III.2.3.2 -Les pompes .....	37
a) La pompe volumétrique .....	38
b) La Pompe centrifuge.....	39
1 -Constitution de la pompe centrifuge.....	39
2-Principe de fonctionnement .....	40
3-Modélisation de la pompe centrifuge .....	40
3-1-Les pertes de charge .....	40
4 - Les pompes de surface et les pompes immergées .....	42
5 - Méthodes de pompage .....	43
5.1 Pompage sans batteries .....	43
5.2 Pompage avec batteries.....	43
III.2.4 La partie de stockage.....	44

## Chapitre IV: Conception d'un système de pompage PV au niveau du site de Bouira

IV .1 Introduction .....	46
IV.1.2 Situation géographique .....	46
➤ Site d'implantation .....	47
➤ Spécification du site de Bouira.....	47
➤ L'irradiation.....	47
➤ Température.....	47
➤ Vent .....	48
➤ Trajectoire du soleil .....	49
IV.1.3 Les étapes de dimensionnement de l'installation .....	50
IV.1.3.1 Evaluation des besoins en eau .....	50

# Sommaire

---

IV.1.3 .2 Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire .....	51
IV.1.3.3 Détermination de l'énergie solaire disponible .....	51
IV.1.3.4 Choix des composants .....	51
IV-2 Logique de calcul et dimensionnement.....	53
IV.2.1 la vitesse d'écoulement.....	54
IV.2.2 Le nombre de Reynolds .....	56
IV.2.3 L'énergie de la pompe .....	58
IV.2.4 La puissance hydraulique.....	59
IV.2.5 La puissance absorbée par la pompe (énergie électrique) .....	61
IV.2.6 Estimation de la consommation.....	61
IV.2.7 Estimation de l'irradiation journalière moyenne .....	62
IV.2.8 Détermination de l'énergie consommée nécessaire par jour (la pompe).....	62
IV.2.9 Dimensionnement du générateur PV .....	63
IV.2.9.1 Estimation de la puissance crête du générateur PV .....	64
IV.2.9.2 Détermination du nombre de modules photovoltaïques .....	64
IV.3 Influence des paramètres externes sur le fonctionnement du panneau solaire.....	67
IV.3.1 Le modèle simulé (modèle à une diode).....	67
➤ Modèle d'une cellule idéale.....	67
➤ Modèle d'une cellule réelle .....	68
IV.3.2 L'évolution du courant en fonction de la tension .....	71
IV.3.3 Evolution de la puissance en fonction de la tension .....	72
IV.3.4 Influence de la température sur les caractéristiques externes du module .....	72
IV.3.5 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques externes du module.....	74
Conclusion Générale .....	77

## Références Bibliographiques

## Annexes



# Nomenclature

### Abréviation

AM :	Air masse.
DC ou CC :	Courant Continu.
DA ou AC :	Courant Alternatif.
EVA :	Ethylène-Vynil- Acétate.
FLC :	Fuzzy Logic Controller.
GPV :	Le générateur photovoltaïque.
$H$ :	Hauteur totale.
$H_s$ :	Hauteur statique.
$H_d$ :	Hauteur Dynamique.
HMT :	La Hauteur Manométrique Totale.
I :	Rayonnement incident.
K :	Coefficient correcteur.
MPPT :	Maximum Power Point Tracking.
N :	Le nombre de jours de l'année.
$N_M$ :	Le nombre de modules.
NOCT [ $^{\circ}$ C] :	Température d'utilisation normale de la cellule.
$N_s$ et $N_p$ :	Le nombre des module respectivement en série et en parallèle.
NF :	Neuro-Fuzzy algorithm.
PV :	Photovoltaïque.
PPM :	Point de Puissance Maximale de la cellule.
$P_{max}$ :	La puissance maximale.
PWM :	Pulse width modulation (modulation de largeur d'impulsion).
P&O :	Perturbation and Observation.
$P_c$ :	La puissance d'un panneau photovoltaïque.
REM :	Rayonnement électromagnétique.

### Symboles

$\alpha$ :	Rayonnement absorbé.
$\alpha$ :	L'orientation.
$\beta$ :	L'inclinaison.
$\gamma$ :	La hauteur angulaire.
$\lambda$ :	La longitude.
$\theta$ :	L'angle d'incidence.
$\rho$ :	Rayonnement réfléchi.
$\tau$ :	Rayonnement transmis.
$\delta$ :	L'angle horaire du soleil.
$\psi$ :	L'azimut.
$\phi$ :	La latitude.
$\omega$ :	La déclinaison.
ff :	Le facteur de forme.
$\eta$ :	Le rendement.

## Nomenclature

---

$n_s$ et $n_p$ :	Le nombre de cellule respectivement en série et en parallèle.
$C$ [m/s] :	La vitesse de la lumière ( $3 \times 10^8$ ).
$C_H$ [Kg.s.h/m <sup>2</sup> ] :	Constante hydraulique.
$D$ [m] :	Diamètre de la tuyauterie.
$E$ [Joules] :	L'énergie.
$E_p$ [m] :	Energie de la pompe.
$G_{\text{moy}}$ [KWh/m <sup>2</sup> *jr] :	Irradiation journalière de mois défavorable.
$G_i$ [KW/m <sup>2</sup> ] :	Irradiation horaire.
$g$ [m <sup>2</sup> /s] :	Accélération de la pesanteur (gravite).
$H_g$ [m] :	Hauteur géométrique.
$h$ [Js <sup>-1</sup> ] :	La constante de planck $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ Js}^{-1}$ .
$I$ [A] :	Le Courant.
$I_{SC}$ ou $I_{CC}$ [A] :	Courant de court circuit.
$I_{ph}$ [A] :	Le photo-courant.
$I_m$ ou $I_{mp}$ [A] :	Une intensité maximale
$I_{GPV}$ [A] :	Le courant du générateur photovoltaïque.
$L$ [m] :	La longueur de la Tuyauterie.
$M$ [kg] :	La masse.
$P_i$ [W] :	Puissance de l'équipement.
$P_h$ [W] :	Energie hydraulique de la pompe.
$P$ [Pa] :	La pression.
$Q$ [m <sup>3</sup> /s] :	Le débit.
$t_i$ [h] :	Durée d'utilisation de l'équipement.
$T_i$ [h] :	Durée d'irradiation
$V$ [V] :	La Tension.
$v$ [m /s] :	Vitesse moyenne du fluide.
$V_{oc}$ [V] :	Tension de circuit ouvert.
$V_m$ ou $V_{mp}$ [V] :	Tension maximale.
$V_{GPV}$ [V] :	La tension du générateur photovoltaïque.
$\lambda$ [ $\mu m$ ] :	La longueur d'onde.
$\nu$ [Hz] :	La fréquence de photon
$\lambda$ :	Coefficient de pertes de charges majeures.
$\xi$ :	Coefficient de pertes de charges mineures.
$\rho$ [Kg / m <sup>3</sup> ] :	Densité de l'eau.
$\Delta H$ :	Les pertes de charge.
$\Delta H_1$ :	Les pertes de charges majeures.
$\Delta H_2$ :	Les pertes de charge mineures.
$\eta_{ond}$ :	Rendement de l'onduleur.

# Liste des Figures et Des Tableaux



**Liste des Figures**

<b>Chapitre I</b>	
<b>Figure (I.1)</b>	Distance Terre-Soleil
<b>Figure (I.2)</b>	Réflexion du rayonnement
<b>Figure(I.3)</b>	Diffusion du rayonnement
<b>Figure(I.4)</b>	Absorption du rayonnement
<b>Figure(I.5)</b>	spectre solaire hors atmosphère
<b>Figure (I.6)</b>	Irradiation globale journalière au mois de Décembre et Juillet sur le plan horizontal
<b>Figure(I.7)</b>	Irradiation globale journalière au mois de décembre et Juillet sur le plan normal
<b>Chapitre II</b>	
<b>Figure(II.1)</b>	Coupe transversale d'une cellule PV
<b>Figure(II.2)</b>	Caractéristique courant – tension d'une cellule photovoltaïque
<b>Figure(II.3)</b>	Cellule silicium monocristalline et Polychristallin
<b>Figure(II.4)</b>	Cellule Silicium amorphe
<b>Figure(II.5)</b>	facteur de forme pour une cellule PV
<b>Figure(II.6)</b>	Module photovoltaïque
<b>Figure(II.7)</b>	Boite de jonction
<b>Figure(II.8)</b>	Caractéristiques résultantes d'un groupement de $n_s$ cellules en série.
<b>Figure(II.9)</b>	Caractéristiques résultant d'un groupement de $n_p$ cellules en parallèle.
<b>Chapitre III</b>	
<b>Figure(III.1)</b>	Description d'un système de pompage PV
<b>Figure(III.2)</b>	Diagramme du pompage PV par motopompe à CC
<b>Figure(III.3)</b>	Diagramme du pompage PV par motopompe à AC
<b>Figure(III.4)</b>	Caractéristiques débit- vitesse ; couple -vitesse d'une pompe volumétrique
<b>Figure(III.5)</b>	Schéma de principe d'une pompe centrifuge
<b>Chapitre IV</b>	
<b>Figure(IV.1)</b>	Carte géographique de la Wilaya de Bouira
<b>Figure(IV.2)</b>	L'irradiation globale journalière mensuelle dans la région de Bouira
<b>Figure(IV.3)</b>	Température moyenne mensuelle à Bouira
<b>Figure(IV.4)</b>	Vitesse moyenne mensuelle des vents
<b>Figure(IV.5)</b>	Trajectoire du soleil à Bouira

## Liste des Figures

---

<b>Figure(IV.6)</b>	Schéma et dimensions de l'installation hydraulique (Puits, pompe, conduites et Réservoir)
<b>Figure(IV.7)</b>	Abaque de Moody.
<b>Figure(IV.8)</b>	courbe hydrauliques des pompes Speroni
<b>Figure(IV.9)</b>	Configuration du générateur solaire PV résultant
<b>Figure(IV.10)</b>	Modèle de la cellule idéale
<b>Figure(IV.11)</b>	Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque réel
<b>Figure(IV.12)</b>	Caractéristique I-V du panneau dans les conditions standard.
<b>Figure(IV.13)</b>	l'évolution de la puissance en fonction de la tension dans les conditions standard
<b>Figure(IV.14)</b>	Influence de la température sur la caractéristique I-V
<b>Figure(IV.15)</b>	Influence de la température sur la caractéristique P-V
<b>Figure(IV.16)</b>	L'effet de l'irradiation sur la caractéristique I-V
<b>Figure(IV.17)</b>	L'effet de l'irradiation sur la caractéristique P-V

## Liste des Tableaux

---

### Liste des Tableaux

<b><i>Chapitre I</i></b>	
<b><i>Tableau (I.1)</i></b>	Répartition du potentiel solaire en Algérie
<b><i>Chapitre III</i></b>	
<b><i>Tableau (III.1)</i></b>	Résumé des principaux avantages et inconvénients de différents types des moteurs utilisés le plus souvent dans les systèmes de pompage PV
<b><i>Chapitre IV</i></b>	
<b><i>Tableau(IV.1)</i></b>	Spécifications du site de Bouira
<b><i>Tableau(IV.2)</i></b>	Les valeurs de l'irradiation globale journalière mensuelle
<b><i>Tableau(IV.3)</i></b>	La vitesse moyenne mensuelle de vent
<b><i>Tableau(IV.4)</i></b>	Caractéristiques techniques de la pompe Speroni
<b><i>Tableau(IV.5)</i></b>	Caractéristiques électriques de l'Onduleur

# Introduction Générale



## Introduction Générale

Avec une superficie de 2.381.741 km<sup>2</sup>, l'Algérie est le pays le plus vaste du côté de la Méditerranée, elle offre des potentialités intéressantes, à moyen et à long terme, pour investir dans de nombreux projets et de programmes qui contribuent au développement des énergies renouvelables, principalement l'énergie solaire.

En effet, notre pays dispose d'un potentiel énergétique solaire très élevé. Selon les données d'ensoleillement et offre par conséquent l'opportunité d'exécuter des grands projets solaires.

Les progrès dans la connaissance du rayonnement solaire et dans la conception des dispositifs techniques de collecte et de conversion jalonnent le développement scientifique et industriel des sociétés.

Les lois physiques gouvernant les différentes filières solaires ont été établies il y a plus d'un siècle et demi. Mais l'histoire de l'énergie solaire a connu une accélération importante à la suite de la crise pétrolière de 1973.

Les diverses technologies solaires sont parvenues aujourd'hui des différents stades de développement, et de recherche au stade de réalisations industrielles.

Ces techniques peuvent rendre un certains nombres de services énergétiques à la place d'énergies conventionnelles : fourniture d'eau chaude, chauffage de locaux. Elles peuvent aussi apporter un service énergétique là où les autres énergies ne vont pas : sites isolés, monde rural de pays en développement.

L'énergie solaire n'a pas besoin d'une technologie de pointe pour son utilisation, propre non polluante, disponible sur l'ensemble du globe terrestre, évidemment à différente intensité, durable et inépuisable.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

Le but poursuivi dans le cadre de ce mémoire consiste à faire le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque complet pour le pompage de l'eau en répondant à des besoins exprimés dans un site donné (Bouira).

De part sa complexité, ce système offre la possibilité de traiter plusieurs domaines, tels que l'hydraulique, l'électricité et l'effet photovoltaïque.

A cet effet, l'étude présentée est rédigée en principaux chapitres qui se résument comme suit:

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur l'énergie et le rayonnement solaire avec leurs applications ainsi qu'une présentation du potentiel solaire en Algérie.

Le deuxième chapitre présente une explication de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, autrement dit « l'effet photovoltaïque ». Nous avons détaillé les caractéristiques électriques des cellules solaires et classification des systèmes Photovoltaïques ainsi les Avantages et les Inconvénients d'un système PV.

La composition générale d'un système de pompage photovoltaïque ainsi que les éléments théoriques permettant de dimensionner les stations de pompage courantes (champ photovoltaïque, convertisseur et groupe motos-pompe), sont présentés dans le troisième chapitre.

Le quatrième chapitre a été entièrement consacré à une étude pratique de ce type de pompage d'eau sur le site de Bouira. Nous avons réalisé un dimensionnement complet d'un système de pompage PV fonctionnant par la méthode dite « pompage sans Batterie » ainsi qu'une simulation avec logiciel Matlab pour avoir l'influence des différents paramètres météorologiques sur les caractéristiques du panneau photovoltaïque.

Ce mémoire sera terminé par une conclusion générale.

# Chapitre I

## Généralités sur l'énergie solaire

### I.1 Introduction

L'énergie solaire est l'énergie que dispose le soleil dans son rayonnement, direct ou diffus sur terre. Grâce à divers procédés, elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou en biomasse. Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir de cette dernière.

Il existe aujourd'hui des technologies permettant de transformer l'énergie solaire pour les besoins humains à savoir :

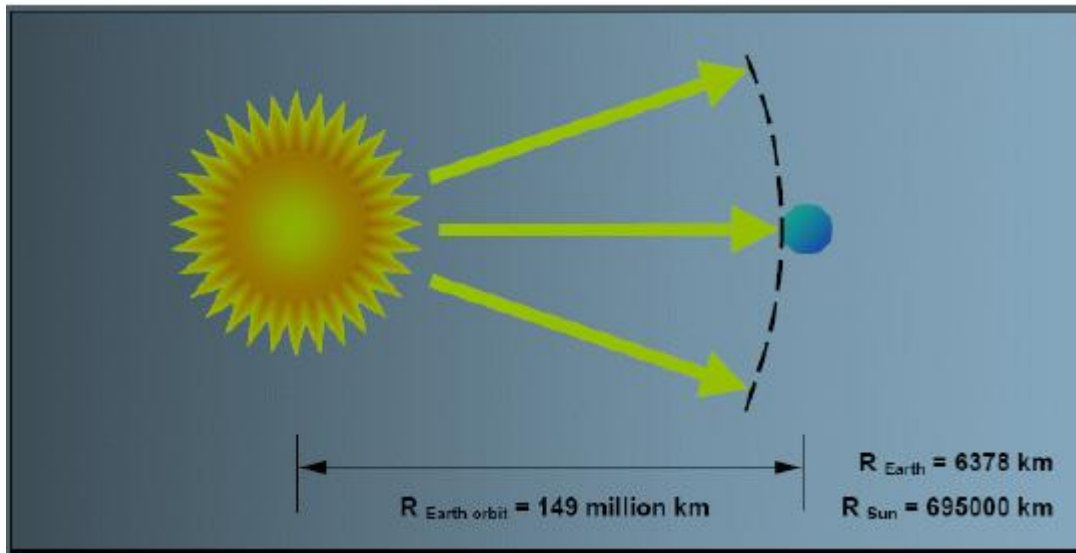
- Le solaire photovoltaïque (PV) pour la production d'électricité.
- Le solaire thermique pour la production de chaleur.
- Le solaire thermoélectrique pour la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par le passage intermédiaire d'une conversion en énergie thermique. Ce dernier est cependant peu adapté à une utilisation agricole en raison de son coût et de sa complexité.

### I.2 Le rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 10 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tout les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein  $E=mc^2$ , ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène –hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [1].

Ce rayonnement est transmis dans l'espace de manière uniforme et dans toutes les directions. Lorsque l'énergie a voyagé 150 millions de kilomètres du Soleil vers la Terre, sa densité extraterrestre totale diminue à  $1367 \text{ W/m}^2$ . Cette valeur est connue sous le nom de constante solaire.



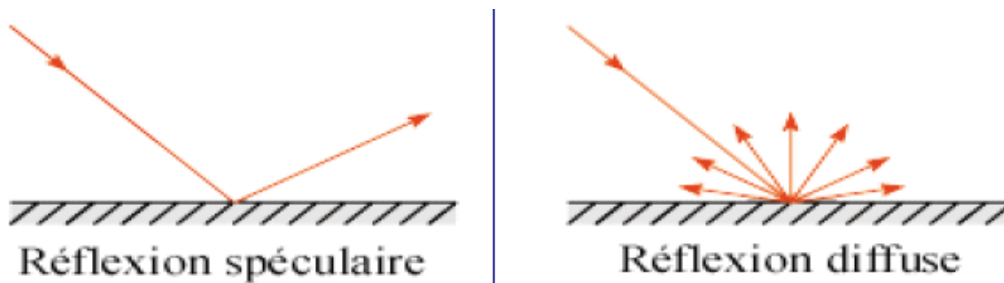


*Figure (I.1) : Distance Terre-Soleil. [2]*

### I.2.1 Les caractéristiques du rayonnement solaire

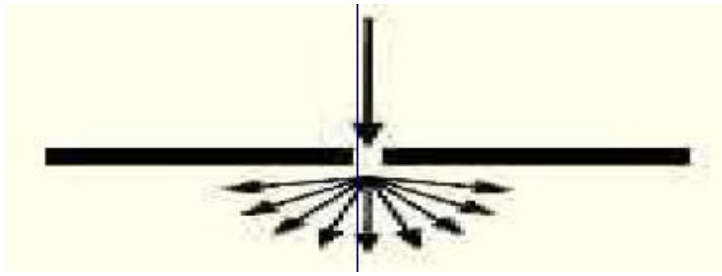
Le rayonnement solaire est caractérisé par trois propriétés importantes :

- **La réflexion :** Lors d'un changement de milieu de propagation, une partie de l'onde électromagnétique repart vers le milieu d'origine, c'est la réflexion. La réflexion peut être spéculaire, c'est à dire qu'elle est dirigée entièrement dans une seule direction, ou diffuse lorsqu'elle est dirigée dans toutes les directions.



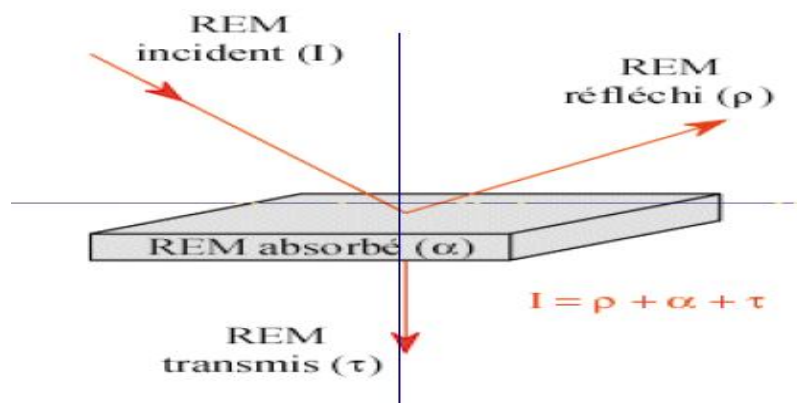
*Figure (I.2) : Réflexion du rayonnement. [3]*

- **La diffusion :** Des particules microscopiques, comme celles contenues dans l'atmosphère, amènent la diffusion dans toutes les directions d'une partie du Rayonnement sous forme d'ondes électromagnétiques (REM). Le REM traversant ce milieu peut alors être considérablement transformé.



**Figure (I.3):** Diffusion du rayonnement. [3]

- **L'absorption :** Un corps qui reçoit une quantité de REM peut en absorber une partie. Cette énergie absorbée est transformée et modifie l'énergie interne du corps. [3]



**Figure (I.4) :** Absorption du rayonnement. [3]

### I.3 Spectre du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde  $\lambda$ , elle est donnée par la formule suivante :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.1)$$

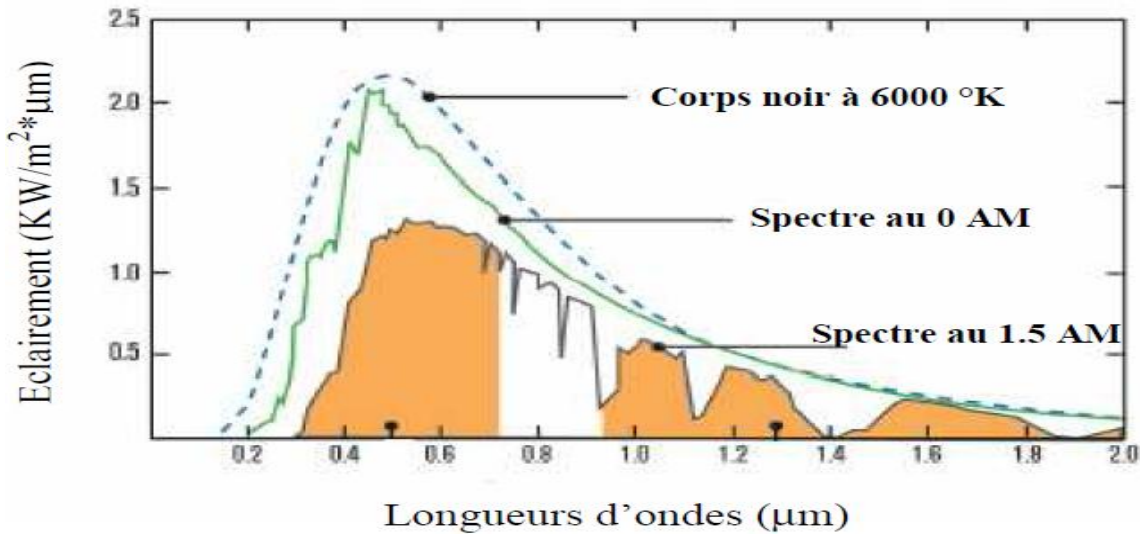
Où :

$h$  : La constante de Planck  $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ Js}^{-1}$

$c$  : La vitesse de la lumière  $c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$

La figure (I.5) représente le spectre du rayonnement extraterrestre correspondant environ à l'émission d'un corps noir porté à  $5800^\circ \text{ K}$ . Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en :

Ultraviolet UV	$0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$	06.4%.
Visible	$0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$	48.0%.
Infrarouge IR	$0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$	45.6%.



Figure(I.5): Spectre solaire hors atmosphère. [1]

#### I.4 Modèles de coordonnées soleil [1]

##### I-4-1 Angle solaire

Les angles solaires sont des facteurs intéressants pour le calcul de rayonnement solaire.

- **La latitude** ( $\varphi$ ) : est l'angle formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu considéré, au centre de la terre. Les latitudes de l'hémisphère Nord sont affectées d'un signe positif et celles de l'hémisphère Sud d'un signe négatif.

- **La longitude** ( $\lambda$ ) : représente l'angle formé par le plan méridien de lieu considéré et le plan méridien origine. Ce dernier passe par l'observatoire de Greenwich et a pour longitude  $0^0$ . Les longitudes situées à l'est de ce méridien sont positives et celles situées à l'Ouest négatives.

- **La déclinaison** ( $\omega$ ) : c'est l'angle entre la direction du soleil et le plan équatorial. Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. Sa valeur varie entre  $-23.7^0$  (Au solstice d'hiver) et  $+23.7^0$ , (au solstice d'été) et s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne. Cet angle varie très peu pendant une journée, ce qui permet

d'approcher le mouvement quotidien du soleil par une rotation sur cône d'axe l'équateur de demi angle au sommet  $\omega = 90^\circ - \varphi$ . L'angle  $\omega$  sera donc fonction du jour de l'année.

$$\omega = +23.45^\circ \times \text{Sin} \left( \frac{360}{365} N - 80 \right) \quad (\text{I.2})$$

N est le nombre de jours de l'année compté à partir du 1<sup>er</sup> janvier, il varie de 1 à 365 ou 366

Selon l'année :

Année civile : 365 jours.

Année bissextile : 366 jours.

- **L'azimut ( $\psi$ )** : qui est l'angle formé par projection de la direction du soleil et la direction du Sud. Il est compté positif à l'Ouest (le matin) et négatif à l'Est (le soir). Sa valeur est obtenue lorsque le soleil se couche (suivant la hauteur angulaire du solaire, et l'inclinaison du panneau) :

$$\text{Tan}(\psi) = \frac{\sin(\delta)}{\sin(\varphi) \cos(\delta) - \cos(\varphi) \sin(\omega)} \quad (\text{I.3})$$

Les autres angles sont liés directement au positionnement du capteur, et permettent de corriger les pertes liées au trajet optique des rayons lors de la traversée de l'atmosphère. On cite :

- **L'orientation ( $\alpha$ )** : du capteur par rapport au sud, ( $0^\circ$  au sud,  $180^\circ$  au nord,  $+90^\circ$  à l'ouest et  $-90^\circ$  à l'est. dans notre cas, cette variation est mise à zéro.

- **L'inclinaison ( $\beta$ )** : du capteur par rapport au sol ( $0^\circ < \beta < 90^\circ$ ). Elle est nulle pour ce qui est du plan horizontal dans le calcul du premier angle d'incidence puis de  $45^\circ$  pour le second.

### I.5 Le Potentiel Solaire en Algérie

De part sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde.

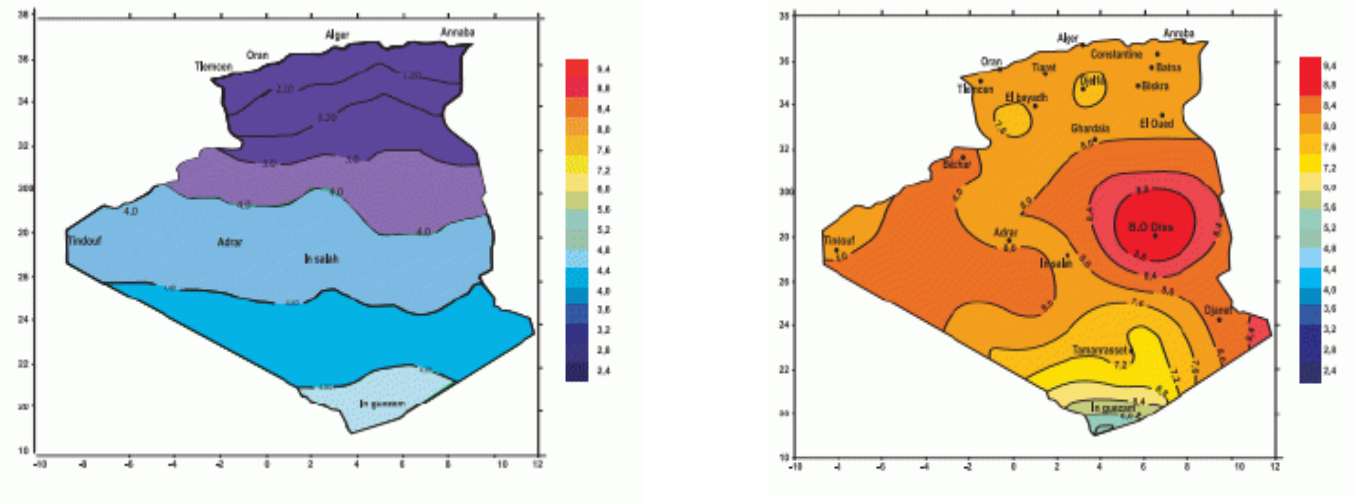
La durée d'ensoleillement sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m<sup>2</sup>.an au nord et 2263kwh/m<sup>2</sup>.an au sud du pays. Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique. [2]

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire de notre pays est présentée dans le tableau (I.1), selon l'ensoleillement reçu annuellement. [4]

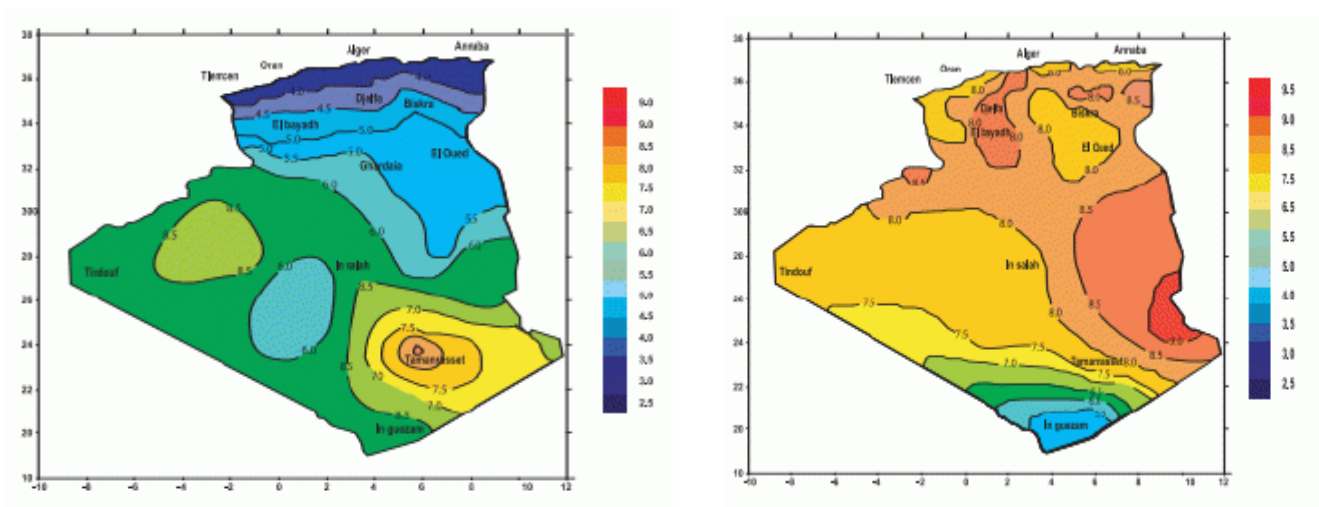
Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> .an)	1700	1900	2650

**Tableau (I.1):** Répartition du potentiel solaire en Algérie. [4]

Les figures (I.6) et (I.7) montrent l'éclairement ou l'irradiation globale journalière sur les plans horizontal et normal aux mois de Décembre et de Juillet [4].



*Figure (I.6) : Irradiation globale journalière au mois de décembre et Juillet sur le plan horizontal.*



*Figure (I.7) : Irradiation globale journalière au mois de décembre et Juillet sur le plan normal.*

Le volet de l'énergie solaire le plus utilisé dans notre pays est le solaire photovoltaïque, les autres volets du solaire, le thermique et thermodynamique, restent toujours au stade expérimental.

Toutefois, le coût et la complexité des procédés de fabrication des modules photovoltaïques et les rendements de production faibles entraînent des coûts très élevés, ce qui freine le développement du photovoltaïque. [4]



**Chapitre II**  
**Etude des systèmes**  
**Photovoltaïques (PV)**

## II.1 Introduction

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre : La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an.

Une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité : c'est **l'énergie solaire photovoltaïque**. [5]

On distingue trois grands types d'applications susceptibles d'être alimentées par l'énergie photovoltaïque, à savoir :

- les systèmes de production autonomes pour l'alimentation de sites ou d'équipements isolés et non raccordés au réseau électrique.
- les systèmes de pompage pour l'adduction d'eau.
- les systèmes de production raccordés au réseau de distribution de l'électricité.

Le solaire photovoltaïque consiste à transformer l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique en utilisant un effet physique de certains matériaux : **l'effet photovoltaïque**. [6]

A l'encontre de l'énergie solaire passive, qui utilise les éléments structuraux d'un bâtiment pour mieux le chauffer (ou le refroidir), et de l'énergie solaire active, qui utilise un caloporteur (liquide ou gazeux) pour transporter et stocker la chaleur du Soleil (chauffe-eau), l'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Elle utilise une photopile pour transformer directement l'énergie solaire en électricité. [7]

## II.2 Historique

Le mot «photovoltaïque» vient du grec «phôtos» qui signifie lumière et de «Volta» du nom du physicien italien qui, en 1800 découvrit la pile électrique.

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis plusieurs dizaines d'années. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil. [8]

### II.2.1 Dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque

1700 : Français Antoine Lavoisier construit le four solaire pour faire fondre le platine

1767 : le suisse Horace de Saussure invente le premier collecteur solaire

1839 : le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque

1861 : le français Augustin Mouchot réinvente le four solaire (à l'aide de l'énergie solaire concentrée)

1875: l'Allemand Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1880 : l'ingénieur américain John Ericsson développe l'entraînement des moteurs par le solaire pour de nombreuses applications

1891 : l'américain Clarence Kamp invente le premier chauffe-eau solaire commercial

1892 : l'américain Aubrey Eneas fonde la société des moteurs solaires de Boston pour alimenter les gros moteurs à vapeur

1950 : intégration de la recherche du photovoltaïque dans les applications spatiales

1954 : Bell Laboratory créé la cellule photovoltaïque moderne (ou photopile) aux Etats-Unis. Les chercheurs ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. [9]

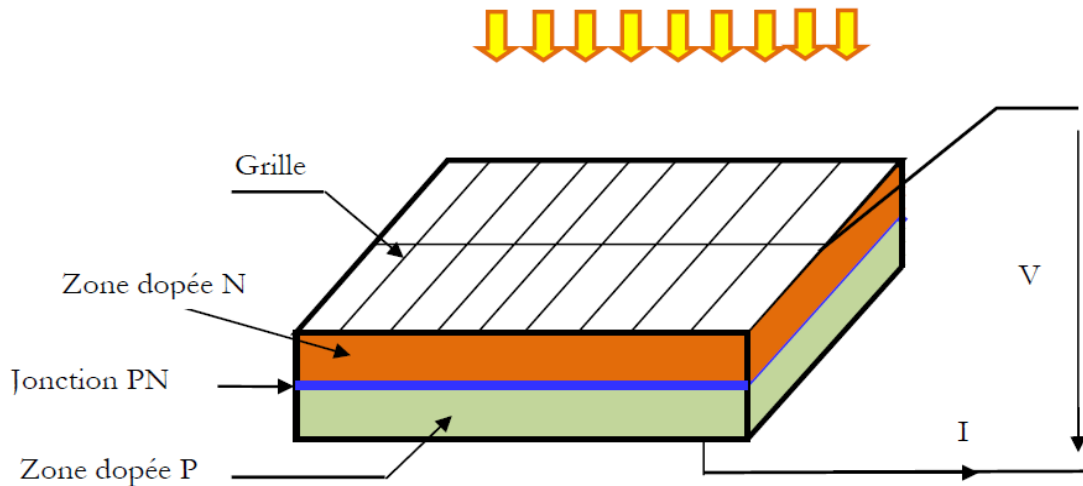
1958: une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1983: la première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

2010 : la plus grande centrale photovoltaïque en Etats-Unis est construite dans le Nevada. [10]

## II.3 Le générateur photovoltaïque GPV

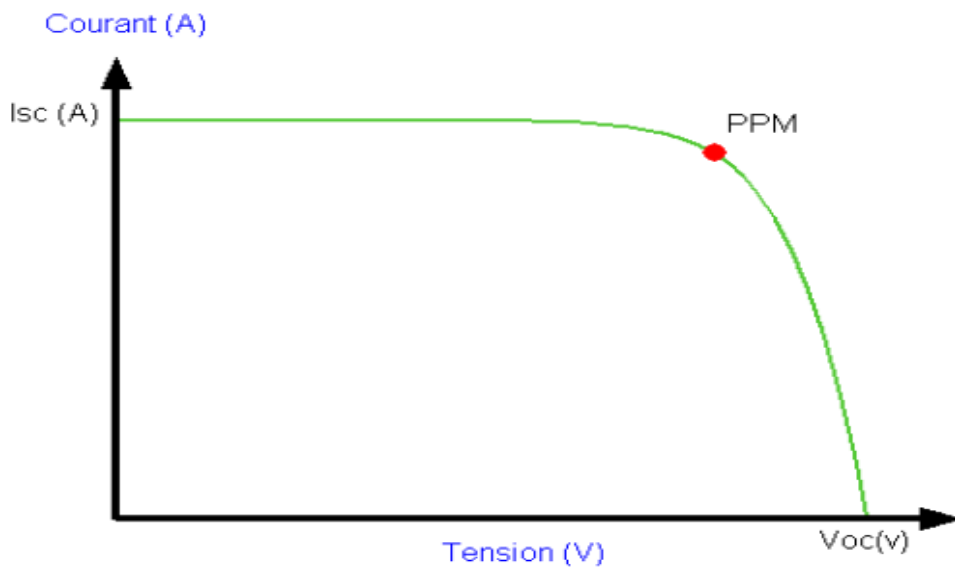
### II.3.1 Principe de fonctionnement



*Figure (II.1) : Coupe transversale d'une cellule PV. [11]*

La figure (II.1) illustre une cellule PV typique. Elle montre clairement sa constitution détaillée. Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au Phosphore) et l'autre couche dopée N (dopée au Bore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule.

D'après la figure (II.2), la cellule solaire PV est caractérisée par la courbe courant en fonction de la tension  $I(V)$ , non linéaire qui dépend particulièrement des conditions d'ensoleillement et de température.



*Figure (II.2) : Caractéristique courant – tension d’une cellule photovoltaïque.*

Il y a trois points importants sur cette courbe :

- Le point de fonctionnement optimal PPM (la puissance maximale de la cellule).
- Le point du courant maximal ( $I_{sc}$ ). Il se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. Il est appelé courant de court circuit ( $I_{sc}$ ) et dépend fortement du niveau d'éclairement (irradiation).
- Le point de la tension maximale de la cellule ( $V_{oc}$ ) (environ 0.6 V) pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ). [11]

### **II.3.2 Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque)**

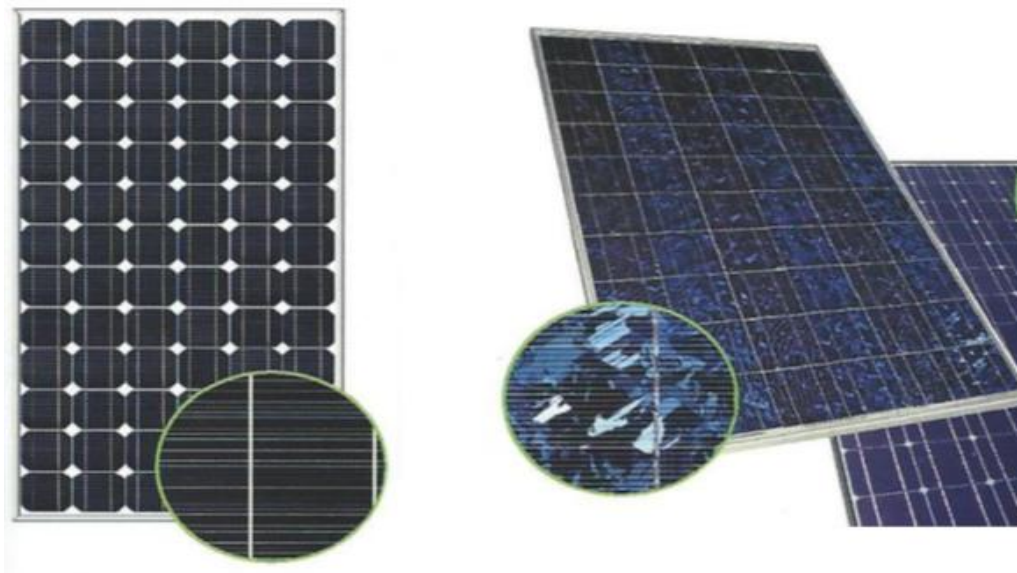
Il existe différents types de cellules photovoltaïques (photopiles). Chaque type de ces cellules est caractérisé par un rendement, un coût et une durée de vie.

Actuellement, trois générations existent, dont deux qui sont très utilisées :

**a) Première génération : avec deux types**

**a-1 Cellules en silicium cristallin**

Elles sont réalisées à partir de la réduction de la silice provenant du quartz. Le silicium doit être pur à plus de 99%, ce qui nécessite des transformations lourdes: fusion, équarrissage. Il est obtenu sous forme de lingot après transformation puis est scié de manière à obtenir des plaques d'une épaisseur de 200  $\mu\text{m}$  environ. L'injection de dopants (phosphore, arsenic, antimoine, bore) le rend semi-conducteur. Une couche antireflet est ensuite déposée (Figure II.3).



**Figure (II.3) :** Cellule silicium monocristalline et Polychristallin.

### 1) Caractéristique Cellule silicium monocristalline

- ✚ Rendement faible sous un faible éclairement
- ✚ perte de rendement avec l'élévation de la température.
- ✚ Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal.
- ✚ Couleur bleue uniforme.

#### Domaines d'applications

Modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites).

#### Avantages

- ✚ Très bon rendement : 14 à 20 %.
- ✚ Durée de vie : importante (30 ans)
- ✚ Robustesse

#### Inconvénients

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.

### 2) Caractéristique Cellule silicium Polychristallin

- ✚ Rendement inférieur au monocristallin.

#### Domaines d'applications

Modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés).

#### Avantages

- ✚ Bon rendement : 11 à 15 %.
- ✚ Durée de vie : importante (30 ans)
- ✚ Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins.

#### Inconvénients

- rendement faible sous un faible éclairement.



## b) Deuxième génération

### ➤ Silicium amorphe [12]

Lors de sa transformation, le silicium émet un gaz projeté sur une feuille de verre en présence d'hydrogène pour contrôler le dopage de types N et P. La technique utilisée est la vaporisation sous vide (Figure II.4).



*Figure (II.4):* Cellule Silicium amorphe.

### Domaines d'applications

Appareils de faible puissance production d'énergie embarquée (calculatrice montres...)  
modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment).

### Inconvénients

- ✚ Rendement faible : 5 à 9 %.
- ✚ Durée de vie : assez importante (20 ans).
- ✚ Diminution de performance au cours du temps.

### Avantages

- ✚ Fonctionnement correct avec un éclairage faible.
- ✚ Peu sensible aux températures élevées.
- ✚ Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium.

## II.4 Constitution d'un générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque se compose de plusieurs modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

### II.4.1 Les cellules solaires

Les cellules photovoltaïques sont des composants électroniques à semi-conducteurs (généralement faites de silicium sous ses différentes formes). Elles convertissent directement l'énergie lumineuse en électricité courant continu basse tension (effet photovoltaïque). Comme l'énergie lumineuse est le soleil, on parle alors de cellules solaires. [2]

#### a) Paramètres caractérisant les cellules photovoltaïques

Les paramètres des cellules photovoltaïques ( $V_{co}$ ,  $I_{cc}$ ,  $P_{max}$ ,  $\eta$  et  $ff$ ), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

##### ➤ La tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ )

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucune charge à son borne, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6 V, appelée tension en circuit ouvert  $V_{co}$  ou à vide (elle varie légèrement avec la température et l'éclairement). [13]

On peut écrire :

$$V_{CO}(I=0)=AU_T \ln\left(\frac{I_{Ph}}{I_s} + 1\right) \quad (II.1)$$

##### ➤ Le courant de court-circuit ( $I_{CC}$ )

A l'inverse du cas précédent, si l'on place une photopile en court-circuit, elle va débiter un courant maximal à tension nulle. Ce courant est dit courant de court-circuit  $I_{CC}$ . De plus, le photo-courant fourni par la cellule est proportionnel à l'intensité lumineuse et à la surface du panneau mis en œuvre, Ainsi, plus ces deux paramètres seront élevés, plus l'intensité produite sera grande. [13]

On peut écrire :

$$I_{CC}(V=0)=I_{Ph} \quad (II.2)$$

➤ **La puissance maximale ( $P_{max}$ )**

L'objectif principal de l'utilisateur de générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale possible, c'est la puissance électrique maximum que peut fournir le module, qui est associée à une tension maximale  $V_m$  et à une intensité maximale  $I_m$ . Lorsque la puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement standard (25°C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>), on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête (Wc).

La puissance fournie par la cellule est donnée par le produit. [13]

$$P = V(I_{ph} - I_s[\exp(\frac{V}{AU_T}) - 1]) \quad (II.3) \quad [14]$$

Le produit ( $V_{max} \times I_{max}$ ) donne la puissance maximale qui représente 80% environ du produit ( $V_{co} \times I_{cc}$ ). [14]

➤ **le rendement  $\eta$**

Le rendement,  $\eta$ , des cellules photovoltaïques désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente. [15,16]

$$\eta = \frac{ffV_p I_p}{P_{incidente}} \quad (II.4)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court circuit et la tension à circuit ouvert. [15,16]

➤ **Le facteur de forme**

Le facteur de forme ff (filling factor) est un paramètre important souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour évaluer la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV. Il est illustré sur la figure (II.5). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{CC} \times V_{CO}$ . Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également.

Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de révolution technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales.

Il est donné par l'expression suivante : [17]

$$ff = \frac{P_{\max}}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (II.5)$$

Le facteur de forme pour une cellule de bonne qualité est supérieur à 0.7 (70%), Il diminue avec l'augmentation de la température.

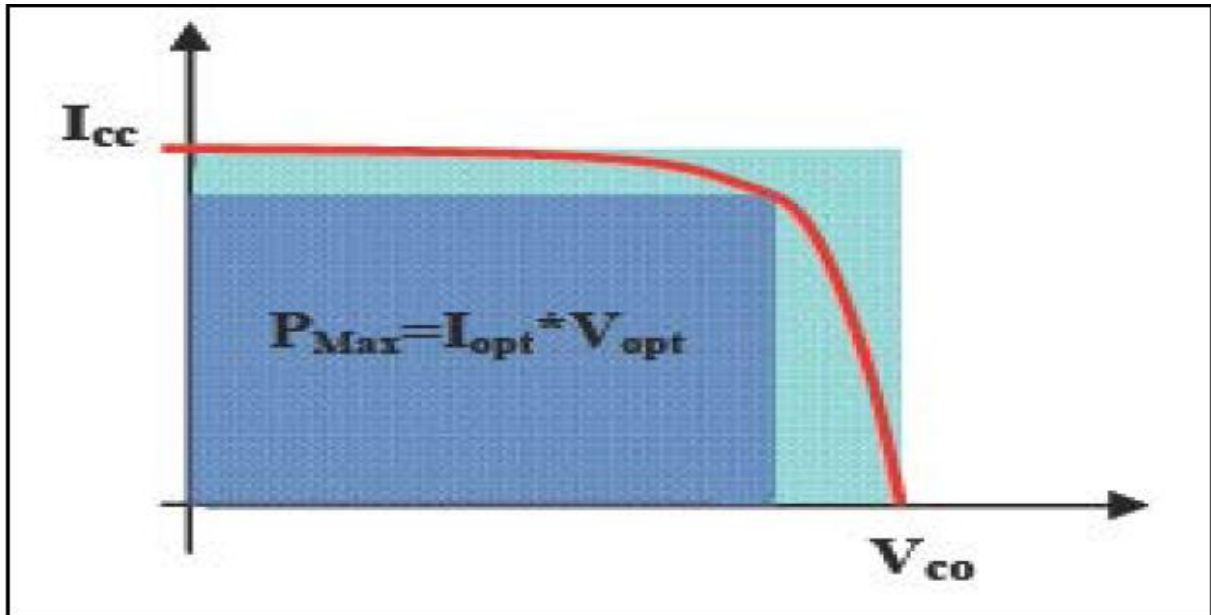
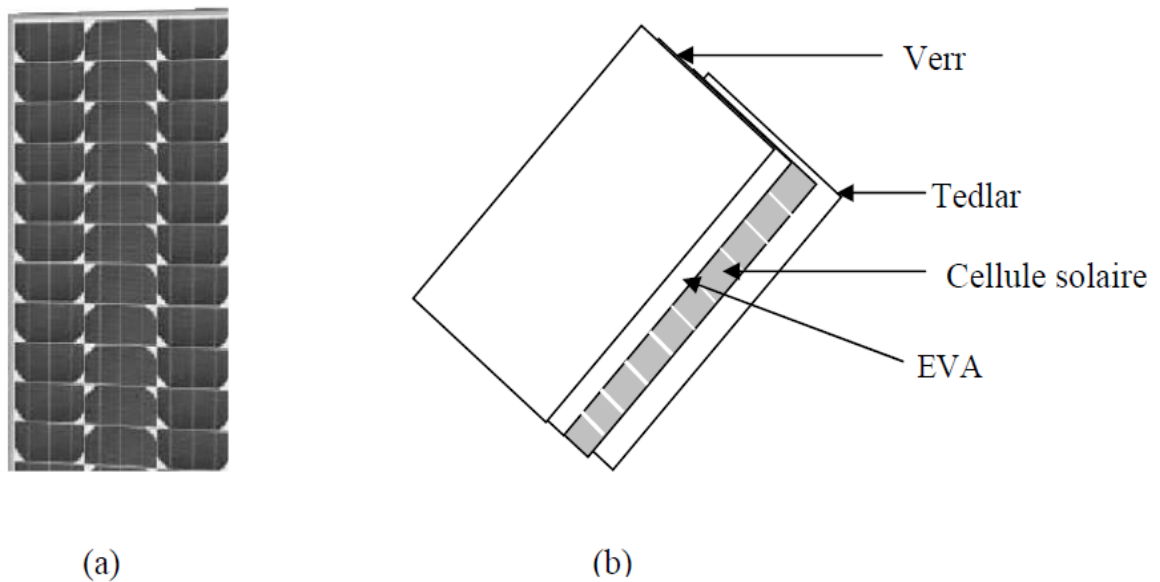


Figure (II.5) : facteur de forme pour une cellule PV. [13]

#### II.4.2 Les modules

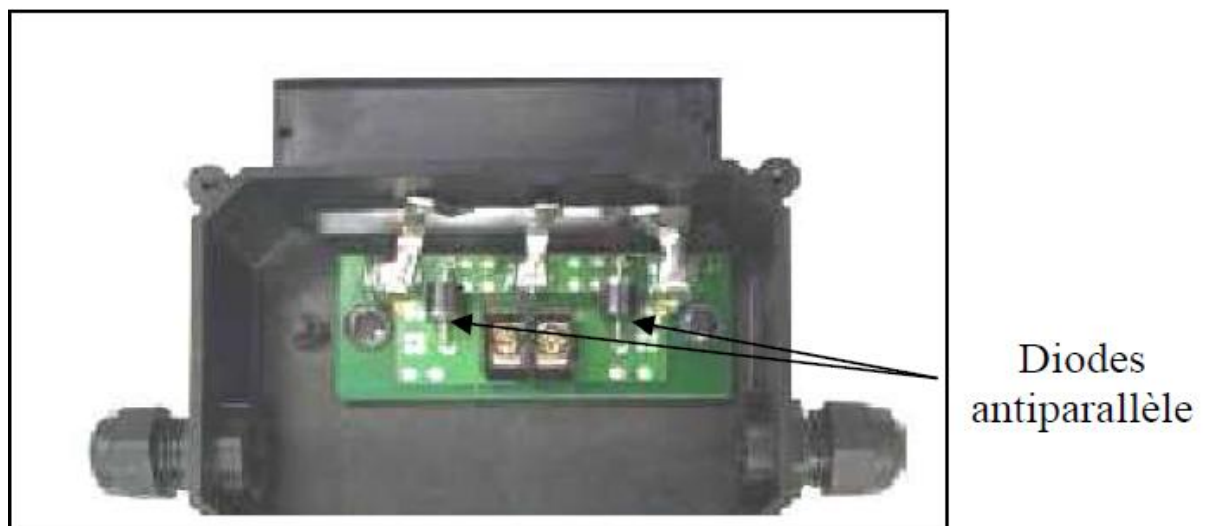
Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module, figure (II.6.a). Les cellules sont disposées, soit en série, soit en parallèle. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension.

Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (Ethylène-Vynil- Acétate), figure (II.6.b). Elles sont aussi protégées sur la surface avant avec du verre, trempé à haute température, caractérisé par une bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière par du polyéthylène. [13]



**Figure (II.6) :** Module photovoltaïque.

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation. A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles figure (II.7). Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre.



**Figure (II.7) :** Boîte de jonction.

Les modules en silicium mono cristallin (c-Si, 64% de marché), poly cristallin ou multi cristallin (xc-Si, 28% du marché) ou silicium amorphe (a-Si, 13% du marché), délivrent des tensions normalisées (12 V, 24 V et 48 V).

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin. Le courant de sortie et la puissance sont proportionnels à la surface du module. Ils ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20%. [1]

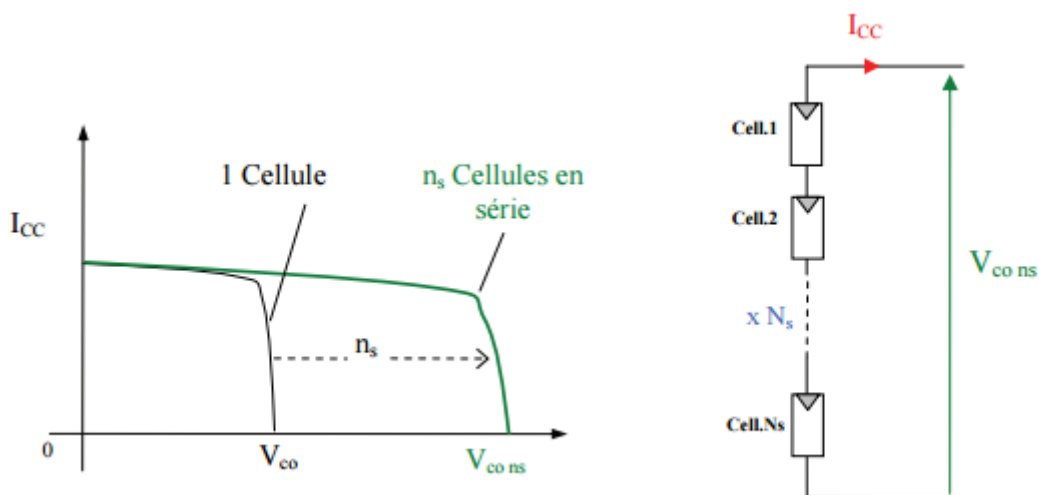
➤ **Association des cellules photovoltaïques en série**

Une association de ( $n_s$ ) cellules en série permet d'augmenter la tension du module photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule (Figure II.8). Les équations (II.6) et (II.7) résument les caractéristiques électriques d'une association série de ( $n_s$ ) cellules.

$$V_{oc_{ns}} = n_s * V_{oc_{cel}} \quad (II.6)$$

$$I_{cc_{ns}} = I_{cc_{cel}} \quad (II.7)$$

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques commercialisés. [18]



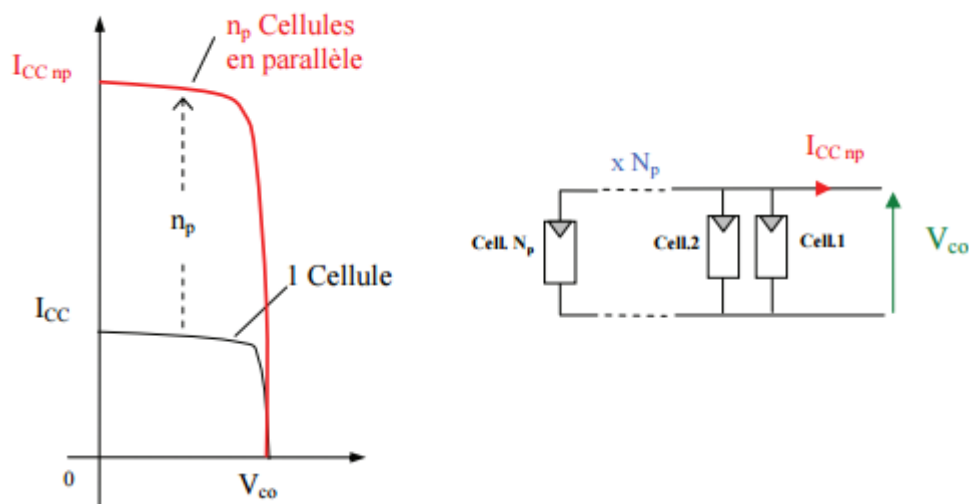
**Figure (II.8):** Caractéristiques résultantes d'un groupement de  $n_s$  cellules en série.

➤ **Association des cellules photovoltaïques en parallèle**

L'association parallèle de ( $n_p$ ) cellules permet d'accroître le courant de sortie du module ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants (figure II.9). Les équations (II.8) et (II.9) résument à leurs tours les caractéristiques électriques d'une association parallèle de ( $n_p$ ) cellules. [18]

$$I_{cc_{np}} = n_p * I_{cc_{cel}} \quad (II.8)$$

$$V_{oc_{np}} = V_{oc_{cel}} \quad (II.9)$$



**Figure (II.9):** Caractéristiques résultant d'un groupement de  $n_p$  cellules en parallèle.

**II.5 Les critères influant sur le rendement de module PV**

Pour que le module photovoltaïque garde toujours un rendement élevé, plusieurs paramètres entrent en jeu et perturbent son fiabilité ou l'inverse. On peut classer ces critères en deux :



### **II.5.1 Critères atmosphériques**

Ces critères sont imposés généralement par les conditions climatiques et dépendent principalement de l'atmosphère et les lieux des installations. On peut citer plusieurs paramètres tels que l'éclairement, la température, la vitesse du vent, la présence de poussières ...etc.

#### **a) L'éclairement (l'irradiation)**

On constate que le rendement dépend de l'éclairement. Ce facteur est variable le long de la journée et on ne peut agir pour l'augmenter. La meilleure solution est de choisir un endroit de fort ensoleillement pour exposer les modules.

#### **b) La température de fonctionnement**

L'augmentation de la température influe directement sur le comportement de la photopile ; elle engendre la diminution de la tension de l'ordre de 2 mV par degré. Cette augmentation se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible, donc, sur le rendement de la cellule.

### **II.5.2 Critères non atmosphériques**

Ce sont les critères qui ne dépendent pas de l'atmosphère et en fonction de ceux-ci on peut augmenter le rendement du module. Les principaux sont les suivants :

#### **a) Le matériau de fabrication**

Ce facteur est très important, et influe directement sur la conversion photovoltaïque, en général le silicium reste le matériau le plus fiable dans la fabrication du module et son rendement est le plus élevé.

### **b) L'inclinaison et l'orientation du module**

En général, la plupart des modules sont statiques. Comme le soleil est en mouvement permanent, il faut donc leur donner une orientation et une inclinaison qui optimise l'énergie fournie annuelle.

L'orientation plein Sud des modules permet de capter un maximum d'énergie au cours de la journée et résulte en un pic de production autour de midi. [19]

L'inclinaison joue un rôle très important pour attirer le maximum de flux solaire, les expériences ont montré qu'il suffit incliner le module d'un angle de 30 degrés pour obtenir un meilleur rendement. [19]

### **c) L'utilisation des régulateurs de charge**

Afin d'améliorer les performances des modules photovoltaïques et d'assurer une meilleure durée de vie. Il est primordial d'installer les régulateurs de charge, tel que de type série, shunt, PWM, MPPT. [20]

## **II.6 Classification des systèmes PV**

### **➤ Système autonome sans batteries**

Dans ces systèmes, la charge de type continu est directement alimentée par le GPV, la production d'énergie est suffisante pour le fonctionnement de la charge.

### **➤ Système autonome avec batteries**

Dans ces systèmes, la batterie sert à stocker de l'énergie produite par le GPV. Cette énergie peut être utilisée de tout temps, même en l'absence de rayonnement solaire.

Ce sont des systèmes qui travaillent 24 h/24 h avec l'énergie solaire convertie en énergie électrique sans l'aide d'aucune autre source électrique. Il faut mentionner que les batteries les plus utilisées dans le marché actuellement sont :

Accumulateurs au plomb-acide et accumulateurs au nickel-cadmium.

### ➤ **Système raccordé au réseau électrique**

Dans ces systèmes, on introduit des générateurs auxiliaires qui n'interviennent qu'en cas d'insuffisances d'énergie électrique (manque de rayonnement solaire ou batteries déchargées), ces générateurs auxiliaires peuvent être de type continu et ou de type alternatif. Les sources auxiliaires peuvent être alimentées soit par le réseau soit par une autre source d'énergie. [21]

Ce type de système offre beaucoup de facilité pour le producteur/consommateur puisque c'est le réseau qui est chargé de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité.[22]

## **II.7 Avantages et Inconvénients de l'énergie PV**

Les systèmes photovoltaïques présentent un grand nombre d'avantages et d'inconvénients qui sont :

### **II.7.1 Avantages**

- Sur le plan écologique, ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- Ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système. Ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- Ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- Une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.
- Ils ont une longue durée de vie.
- Les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

### **II.7.2 Inconvénients**

- La fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.
- Le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 %,
- Ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- L'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage (< à 30 V), qui doit être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.
- Beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif. [21]

**Chapitre III**  
**Systeme de Pompage**  
**Photovoltaique**

### **III.1 Introduction**

Le pompage de l'eau à travers le monde est généralement dépendant de l'électricité conventionnelle ou celle générée par le diesel. La communauté de l'alimentation en eau et de l'irrigation est affectée par le déficit en électricité et les couts élevés du diesel.

À partir de là, l'utilisation de l'énergie solaire est une alternative appréciable et moins coûteuse. Elle minimise la dépendance aux ressources fossiles dont les prix oscillent à travers les années.

Le choix du système de pompage doit être fait en tenant compte non seulement des contraintes techniques (type de pompe, énergie, hauteur de refoulement, débit, régime d'écoulement), mais aussi des contraintes liées au contexte économique (disponibilité des pièces détachées, facilité de maintenance des pompes, ...).

Le système de pompage solaire est basé sur la technologie du photovoltaïque (PV) qui convertit l'énergie solaire en une énergie électrique qui alimente un moteur DC ou AC d'une pompe d'eau. Ce système est important dans les zones rurales et inaccessibles pour les réseaux électriques.

### **III.2 Constitution d'un système de pompage PV**

Le pompage de l'eau est l'une des applications les plus courantes utilisant l'énergie solaire pour l'irrigation ou l'alimentation en eau potable ; ses performances dépendent des caractéristiques du site (ensoleillement, température ambiante, obstacles géographiques), du rendement des modules mais aussi des caractéristiques des autres équipements (onduleur, moteur, pompe,...). La figure (III.1) ci-dessous représente un système de pompage photovoltaïque:

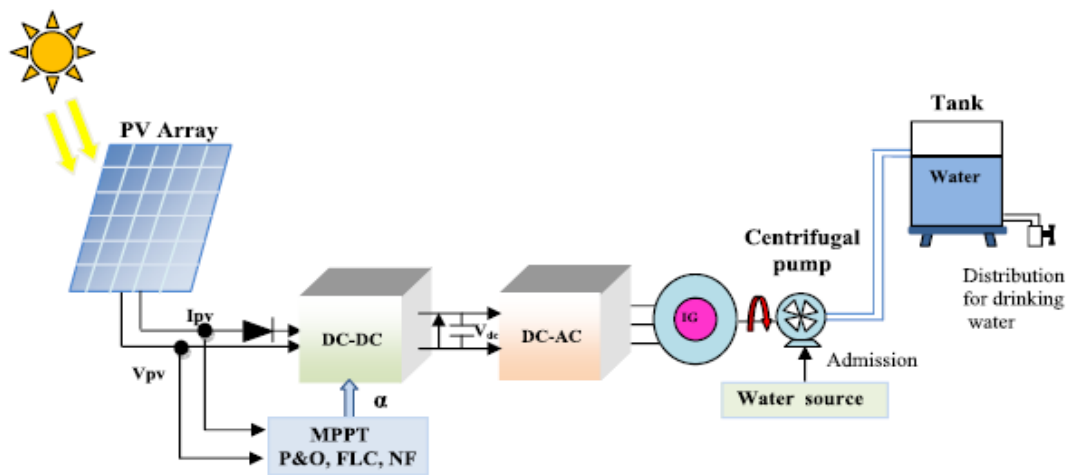


Figure (III.1) : Description d'un système de pompage PV. [23]

### III.2.1 Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque convertit l'insolation solaire en énergie électrique à courant continu. Il se compose d'un réseau des modules qui contiennent des cellules photovoltaïques connectées en série et/ou parallèle afin de fournir la tension continue désirée et le courant. La tension aux bornes et le courant à l'intérieur de la résistance du réseau dépendent du nombre de cellules en série ( $n_s$ ), le nombre de cellules en parallèles ( $n_p$ ) et du rayonnement solaire de la région où le générateur photovoltaïque est installé. [24]

Le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque est caractérisé par :

$$I_{GPV} = N_p \times I \quad (III.1)$$

$$V_{GPV} = N_s \times V \quad (III.2)$$

$I_{GPV}$  et  $V_{GPV}$  sont respectivement le courant et la tension du générateur photovoltaïque et  $N_p$ ,  $N_s$  sont les nombres des modules en parallèle et en série. [21]



### III.2.2 Convertisseur d'énergie

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement entre le champ PV et la charge. On a deux types de convertisseur, l'un portera le nom de convertisseur Continu-Continu et l'autre convertisseur Continu-Alternatif.

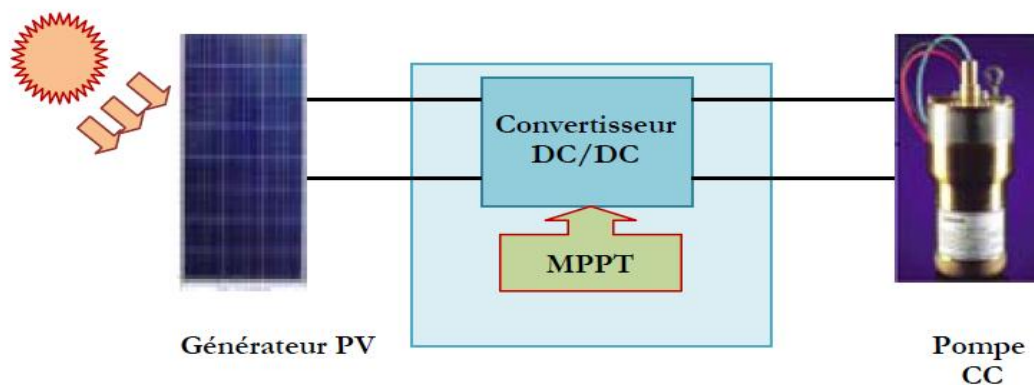
#### III.2.2.1 Le convertisseur DC/DC (hacheur)

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur PV et de la transférer à la charge (pompe alimentée par moteur à courant continu), la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge comme décrit dans la figure (III.2). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle commandé par son rapport cyclique, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale disponible.[11]

Ce système d'adaptation est couramment appelé **MPPT**. Son rendement se situe entre 90 et 95%. [25]

Ce système a deux inconvénients pour un PV de faible puissance :

- Prix élevé.
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important. [25]



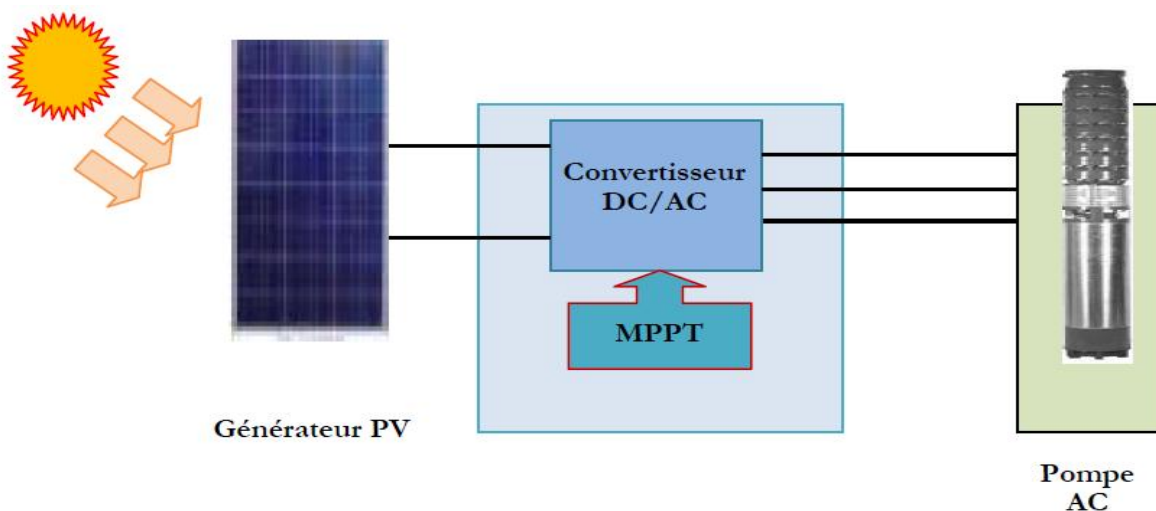
*Figure (III.2) : Diagramme du pompage PV par motopompe à CC.*

○ **MPPT**

Les techniques MPPT sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque en poursuivant continuellement le point de puissance maximale, ce qui n'est pas évident à atteindre. [13]

**III.2.2.2 Le convertisseur DC/AC (onduleur)**

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par les panneaux solaires en un courant alternatif pour actionner le groupe motopompe. L'onduleur fonctionne évidemment avec un circuit de génération des signaux PWM commandé par un circuit de régulation et de protection. Le convertisseur DC/AC assure le transfert optimal de puissance du générateur solaire vers le groupe motopompe et protège la pompe contre le fonctionnement à vide lorsqu'il n'y a pas d'eau dans le puits. Le rendement de l'onduleur est généralement élevé pour valoriser au mieux l'énergie produite par le générateur. Il est de l'ordre de 95 % au point de fonctionnement nominal. [11]



*Figure (III.3):* Diagramme du pompage PV par motopompe à AC.

**III.2.3 Le groupe motopompe**

La pompe est connectée par un moteur électrique soit en courant continu (CC) ou bien en courant alternatif (AC) pour convertir l'énergie électrique reçue en une énergie mécanique qui sera elle-même convertie en énergie hydraulique.

### III.2.3.1 Le Moteur

Les pompes sont alimentées par un moteur électrique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Ils fonctionnent soit en alternatif, soit en continu. Parmi les moteurs nous distinguons, trois types de moteurs qui sont utilisés dans les systèmes de pompage PV:

- Les moteurs à courant continu.
- Les moteurs à courant alternatif.
- Les moteurs à courant continu, sans balais, à commutation électronique. [25]

Les critères qui permettent d'établir le choix le plus judicieux du moteur sont les suivants [26]

- ✓ Bon rendement.
- ✓ Souplesse de fonctionnement.
- ✓ Robustesse du matériel afin de limiter au maximum l'entretien et les risques de pannes.
- ✓ Fiabilité et autonomie de l'installation.
- ✓ Faible puissance au démarrage.

#### Avantages et inconvénients des moteurs

Quelques avantages et inconvénients de chacun de ces moteurs. [27, 28, 29]

	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>Moteur à courant alternatif</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disponible dans le marché avec un coût bas.</li> <li>- ne nécessite pas un entretien de fait de l'absence complète de pièces en frottement.</li> <li>- Son utilisation augmente l'autonomie et la fiabilité de l'installation.</li> <li>- Disponible pour une large plage de charge.</li> <li>- Le rapport puissance / poids est élevé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessité d'utiliser un onduleur avec des spécifications photovoltaïques (coût supplémentaire).</li> <li>- Chute de rendement aux faibles puissances.</li> <li>- Appel de courant au démarrage qui peut atteindre cinq fois l'intensité normale.</li> </ul>
<b>Moteurs à courant continu avec balais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simplicité et facilité de régulation (variation de vitesse, couple,..)</li> <li>- Couplage direct avec le générateur (sans onduleur).</li> <li>- Rendement élevé pour les faibles charges.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Présence de balais et collecteur qu'il faut vérifier périodiquement</li> <li>- Plus lourd et plus coûteux.</li> </ul>

<p><b>Moteurs à courant continu sans balais (brushless DC)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rendement élevé pour une large gamme de vitesse.</li> <li>- Couplage directe avec le générateur photovoltaïque.</li> <li>- Moins de maintenance avec une bonne fiabilité.</li> <li>- Un rapport couple / poids élevé, d'où un volume modéré.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessite un système de commutation (coût supplémentaire).</li> </ul>
--	--	--

*Tableau (III.1) : Résumé des principaux avantages et inconvénients de différents types des moteurs utilisés le plus souvent dans les systèmes de pompage PV.*

### III.2.3.2 -Les pompes

Une pompe est une machine servant à véhiculer un liquide qui peut être de l'eau ou autres (pétrole, huile...) en l'aspirant pour le refouler à une certaine pression. Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. Alors que cette première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules, la pompe sans batterie, utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation [22].

Les critères qui guident le choix d'une pompe sont les suivants:[22]

- La nature du liquide pompé, viscosité, température, présence de corps solides.
- Le débit et la pression souhaités.
- L'énergie consommée.

#### **-Différentes types des pompes**

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. On distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée: la pompe à aspiration et la pompe à refoulement. [7,34]

### a) La pompe volumétrique

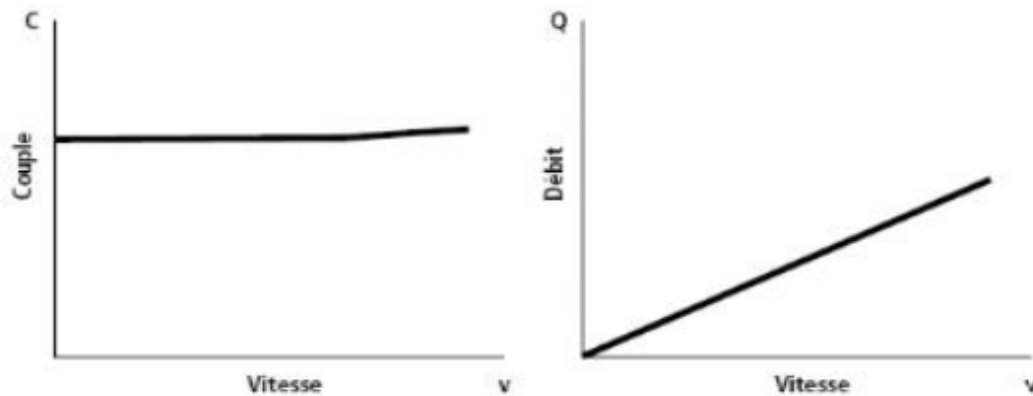
Une pompe volumétrique est une pompe dans laquelle l'écoulement du liquide est en proportion constant avec le déplacement d'un organe mobile du corps de la pompe. Les pompes volumétriques sont deux sortes:

- ✓ Les pompes volumétriques alternatives.
- ✓ Les pompes rotatives

#### 1) Caractéristiques d'une pompe volumétrique

##### 1-1-Caractéristiques débit- vitesse

- Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur.
- son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale (HMT) et il est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur.
- Le couple de démarrage est donc pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à la HMT. La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse.[14]



*Figure (III.4):* Caractéristiques débit- vitesse ; couple -vitesse d'une pompe volumétrique.

##### 1-2 Caractéristique puissance- vitesse

La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau. On les utilise parfois comme pompes de surface lorsque le couple est lent et irrégulier et que le débit demandé est faible, par exemple pour les pompes à main et les pompes éoliennes multiples. [30]

## b) La Pompe centrifuge

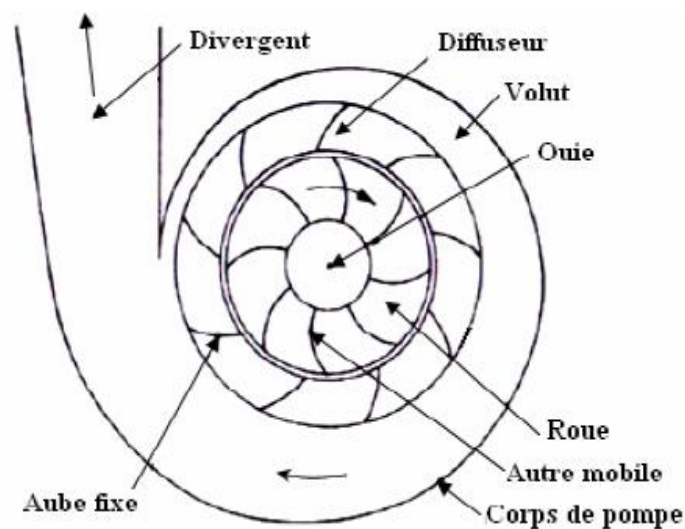
Les pompes centrifuges sont les plus utilisées dans les systèmes de pompage photovoltaïques. Les pompes centrifuges sont conçues pour une tête fixe et leur rendement en eau augmente avec la vitesse de rotation. Les pompes centrifuges sont simples, à prix réduit et sont disponibles pour une large gamme de débit. [31]

### 1 -Constitution de la pompe centrifuge

Les pompes centrifuges sont essentiellement constituées d'une pièce en rotation le rotor appelée aussi roue ou hélice qui tourne dans un carter appelée corps de pompe ou volute.

Ces machines comprennent donc :

- ❖ un distributeur (arrivée du liquide).
- ❖ l'ouïe d'aspiration.
- ❖ le corps de la pompe ou volute.
- ❖ le refoulement qui va s'élargir.
- ❖ l'ouïe de refoulement.



*Figure (III.5) : Schéma de principe d'une pompe centrifuge.*

## 2-Principe de fonctionnement

On peut décomposer le fonctionnement d'une pompe centrifuge en deux étapes :

### 2-1-L'aspiration

Le liquide est aspiré au centre du rotor par une ouverture appelée distributeur dont le rôle est de conduire le fluide depuis la conduite d'aspiration jusqu'à la section d'entrée du rotor.

### 2-2- L'accélération

Le rotor transforme l'énergie mécanique appliquée à l'arbre de la machine en énergie cinétique. A la sortie du rotor, le fluide se trouve projeté dans la volute dont le but est de collecter le fluide et de le ramener dans la section de sortie.

## 3-Modélisation de la pompe centrifuge

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu 3 paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse ayant pour équation: [21]

$$f(H, Q, W) = 0$$

Pour résoudre ce système d'équation, on considère l'un de ces 3 paramètres comme constant. En général, c'est la vitesse qui est prise constante.

La hauteur totale du pompage est la somme de la hauteur statique et de la hauteur dynamique.[11]

$$HMT = H_g + \Delta H \quad (\text{III.3})$$

HMT : Hauteur manométrique totale du pompage.

Hg : Hauteur géométrique.

$\Delta H$  : Pertes de charge majeures et mineures.

### 3-1-Les pertes de charge

Elles représentent les pertes de pression que l'écoulement rencontre pendant son déplacement.

On distingue:

**a) Les pertes de charges majeures (linéaires)**

Produites par le frottement du fluide sur les parois des conduites. Elles sont données par la formule suivante (exprimée en hauteur de liquide, mètre):

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (\text{III.4})$$

$\lambda$  : Coefficient de pertes de charges majeures.

$L$  : Longueur de la tuyauterie (m).

$D$  : Diamètre de la tuyauterie (m).

$g$  : Accélération de la pesanteur ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

$v$  : Vitesse moyenne du fluide (m/s) qui est donnée par:

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (\text{III.5})$$

$Q$  : débit volumique ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \frac{8Q^2}{\pi^2 D^2 g} \quad (\text{III.6})$$

On remarque que les pertes de charges majeures sont proportionnelles à la longueur de canalisation, ces pertes diminuent quand on augmente le diamètre de la canalisation. De ce fait, elles sont fonction du rapport d'aspect.

**b) Les pertes de charges mineures (singulières)**

Produites par tout phénomène ou singularité locale tel que changement de section ou de direction dans la conduite, vanne,...etc. Elles sont données par la formule suivante (exprimée en hauteur de liquide, mètre) :

$$\Delta H_2 = \xi \frac{v^2}{2g} \quad (\text{III.7})$$

$\xi$  : Coefficient de perte de charge mineure.



La perte de charge totale, appelée aussi hauteur dynamique est la somme des deux pertes :

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 \quad (\text{III.8})$$

$$\Delta H = \left( \lambda \frac{L}{D} + \xi \right) \frac{8Q^2}{\Pi^2 D^5 g} \quad (\text{III.9})$$

#### 4 - Les pompes de surface et les pompes immergées

Le choix d'une pompe se fera en fonction des caractéristiques hydrauliques de l'installation envisagée (débit, hauteur manométrique totale, etc.) mais également en fonction des conditions particulières d'utilisation (puits, forage, pompage de rivière, etc.). Une pompe à pistons placée en surface ne pourra pas relever l'eau au-delà d'un maximum théorique de 10,33 mètres. Au-delà de cette hauteur, il faut s'orienter vers une solution de pompe immergée. Cependant, on peut utiliser des pompes centrifuges avec une pression absolue à l'aspiration inférieure à 1 MPa. Les pompes immergées peuvent extraire de l'eau à plusieurs centaines de mètres. Les pompes centrifuges qui ont une forme adaptée aux puits et qui peuvent débiter à forte pression sont souvent utilisées. [32]

##### 4.1 Caractéristiques de la pompe centrifuge immergée

La pompe centrifuge immergée est caractérisée en générale par les paramètres suivants :

- Son diamètre est soit de 4" (95 mm), soit de 6" (142 mm).
- Le corps de pompe est en acier inoxydable, les roues et les diffuseurs étant soit en acier inoxydable, soit en matériau synthétique. Ces matériaux présentent une très bonne résistance à l'abrasion.
- Le corps d'aspiration est protégé par une crépine contre les grosses impuretés supérieures à 3 mm).
- Un clapet anti-retour est intégré à la tête de pompe, qui est taraudée pour le raccordement au tuyau de refoulement. La lubrification est assurée par l'eau pompée.
- Le nombre d'étages est lié à la hauteur manométrique totale de refoulement.

- Le type d'aubage de chaque étage est lié à la puissance hydraulique à fournir pour la Hm nominale.
- Les rendements hydrauliques des pompes solaires sont élevés (utilisation de technologies de pointe). Ils sont de l'ordre de 55% à 60 % au point de fonctionnement nominal.
- La durée de vie peut être estimée entre 5 et 7 ans (elle est fortement liée à la qualité de l'eau).
- L'entretien courant consiste au nettoyage des étages (boue, sable, déchets si la pompe est installée dans un puits). La fréquence de celui-ci dépend de la qualité de l'eau pompée.[25]

### 5 - Méthodes de pompages

D'après la définition de la pompe PV on a trouvé deux techniques pour le pompage la première technique c'est le pompage sans batterie et l'autre le pompage avec batterie.

#### 5.1 Pompage sans batteries

Le pompage sans batteries permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système avec batterie. Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin. [34]

#### 5.2 Pompage avec batteries

La méthode de pompage d'eau en utilisant l'énergie stockée sur des batteries peut avoir l'avantage de garantir une stabilité d'alimentation des équipements (système présente l'avantage d'un débit régulier, la possibilité de pomper lorsque le soleil est absent). L'énergie emmagasinée pour être utilisée aussi pour d'autres besoins ultérieures. L'inconvénient majeur, voire handicapant, de cette technique est qu'elle comporte plusieurs composants qui influent négativement sur la fiabilité et le coût global du système. En effet, les batteries sont fragiles et sont souvent les premiers éléments qui auront besoin d'être changés. Elles nécessitent, en outre, un entretien constant et un contrôle rigoureux de leur charge et décharge. Les contrôleurs utilisés pour régulariser la charge et la décharge des batteries vieillissent rapidement et peuvent s'avérer non fiables. Les batteries introduisent également un certain degré de perte de rendement d'environ 20% à 30 % de la production d'énergie. [11]

### **III.2.4 la partie de stockage**

Le stockage d'énergie peut se faire de deux façons: stockage d'énergie électrique ou stockage d'eau. Cette dernière méthode est souvent adoptée car il est plus pratique de stocker l'eau dans des réservoirs que l'énergie électrique dans des accumulateurs lourds, coûteux et fragiles. De plus, le réservoir peut souvent être construit localement et la capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours. Ce réservoir ne requiert pas un entretien complexe et est facile à réparer localement. [11]

## Chapitre IV

Conception d'un système de  
pompage PV au niveau du  
site de Bouira

## IV .1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons détailler l'étude et le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque. Il est alors intéressant de l'appliquer sur un site réel.

Pour cette étude pratique, nous avons choisi la région de Bouira qui est caractérisée par un climat chaud et sec en été, froid et pluvieux en hiver. La pluviométrie moyenne est de 660 mm/an au nord et de 400 mm/an dans la partie sud. Les températures varient entre 20 et 40 °C de mai à septembre et de 2 à 12 °C de janvier à mars, avec une durée moyenne d'ensoleillement de plus de 1900 heures/an et des ressources importantes d'eau souterraine.

### IV.1.2 Situation géographique

Bouira est située au sud est d'Alger avec une superficie de 4454 km<sup>2</sup>. Elle est délimitée au nord par les wilayas de Boumerdes et Tizi-Ouzou, au sud M'sila et Média, à l'est Bejaia et Bordj Bouarreridj et à l'Ouest Blida et Médéa (figure IV.1).



Figure (IV.1) : Carte géographique de la wilaya de Bouira.

➤ **Site d'implantation**

Pour la simulation de notre projet de la centrale photovoltaïque nous avons appliqué les données géographiques et météorologiques disponibles de la wilaya de Bouira.

➤ **Spécification du site de Bouira**

Pour le site de Bouira, les spécifications sont données dans le tableau suivant:

Latitude : 36,38N	Longitude : 3,9E
Altitude : 635m	Albédo : 0,2

*Tableau (IV.1) : Spécifications du site de Bouira [35].*

➤ **L'irradiation**

L'irradiation globale journalière mensuelle est représentée sur le tableau suivant :

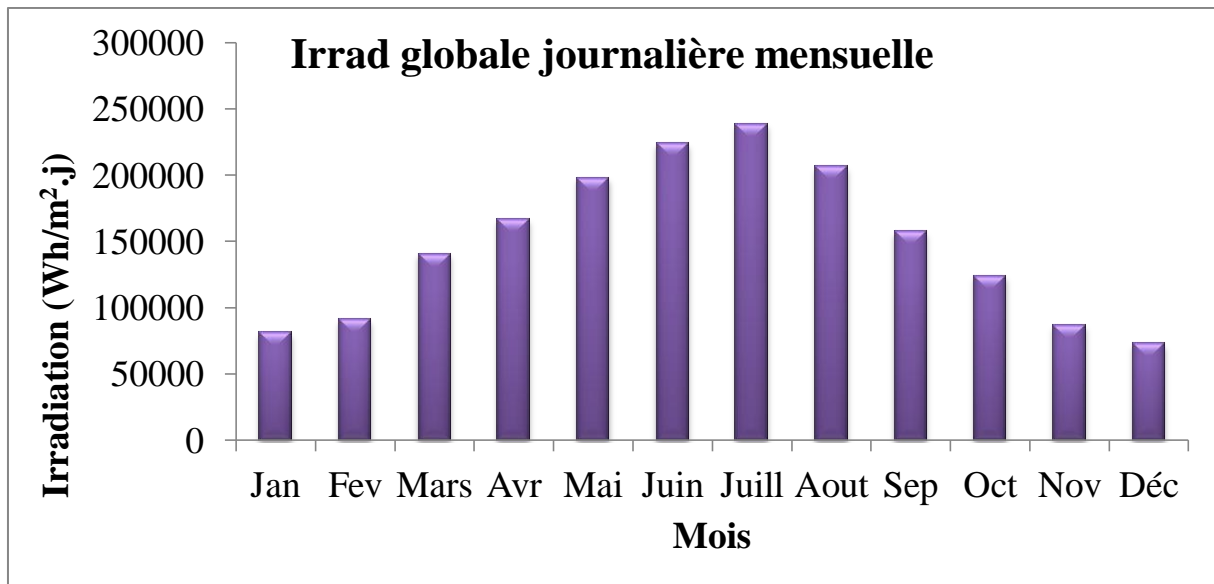
Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
(Wh/m <sup>2</sup> ,j)*10 <sup>3</sup>	2.62	3.26	4.54	5.56	6.39	7.46	7.70	6.66	5.24	4.00	2.90	2.35

*Tableau (IV.2) : Les valeurs de l'irradiation globale journalière mensuelle [35].*

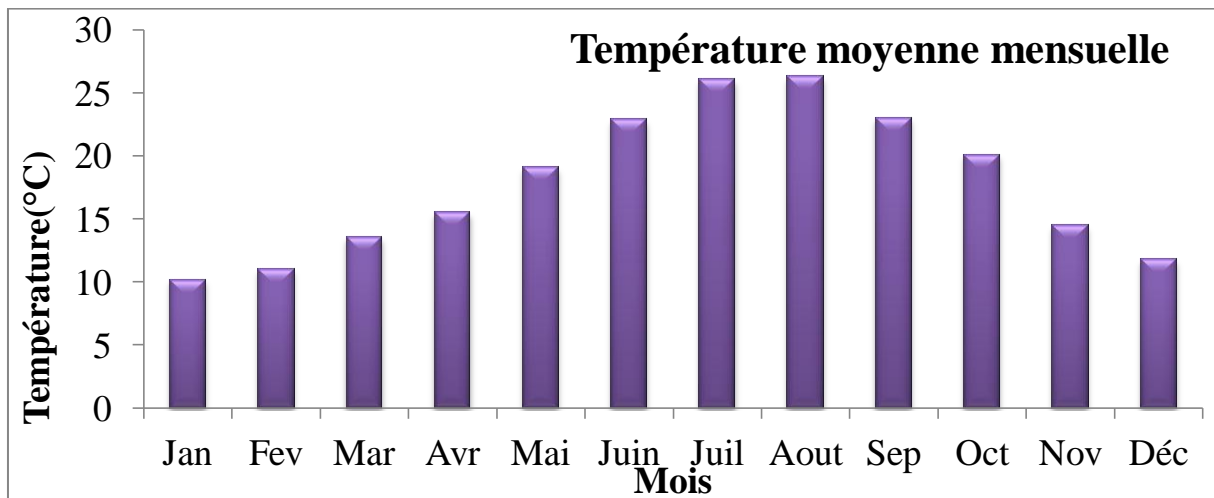
Pour une meilleure lecture, ces valeurs sont représentées graphiquement sur la Figure (IV.2).

➤ **Température**

La température moyenne varie en fonction de la saison. La moyenne mensuelle du mois le plus chaud est de 26.3°C (mois d'Aout). Janvier est le mois le plus froid avec une température moyenne de 10.2°C (figure IV.3).



*Figure (IV.2) : L'irradiation globale journalière mensuelle dans la région de Bouira.*



*Figure (IV.3) : Température moyenne mensuelle à Bouira.*

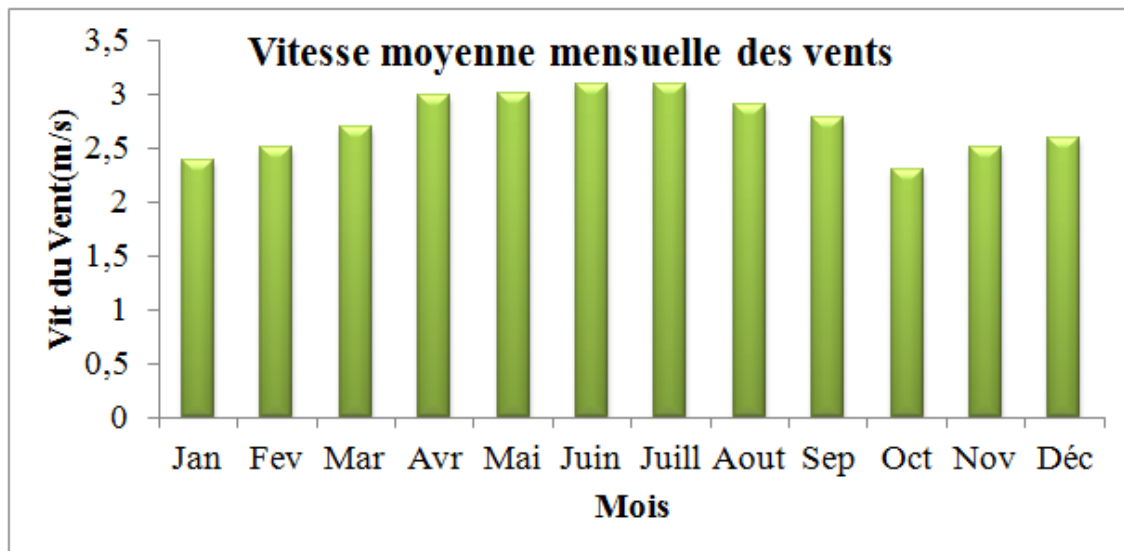
➤ **Vent**

Les vents ont une vitesse moyenne de 2.73 m/s (tableau IV.3). Cette vitesse est plus élevée pendant l'été (juin, juillet) avec plus de 3.0 m/s. Elle est cependant moins élevée durant les mois d'hiver avec une vitesse moyenne de 2,45 m/s.

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Vent (m/s)	2.39	2.5	2.69	2.99	3.0	3.09	3.10	2.90	2.79	2.29	2.5	2.59

**Tableau (IV.3) :** La vitesse moyenne mensuelle de vent [35].

On peut représenter les valeurs graphiquement (figure IV.4):



**Figure (IV.4) :** Vitesse moyenne mensuelle des vents.

#### ➤ **Trajectoire du soleil**

La connaissance du mouvement apparent du soleil pour un point donné de la surface terrestre est nécessaire pour toute application solaire, la position du soleil est définie par deux angles : sa hauteur HS (angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu) et son Azimut AZ (angle avec la direction du sud, compté négativement vers l'est). La figure (IV.5) présente la hauteur de soleil dans le ciel en fonction de l'azimut à Bouira au cours d'une année.



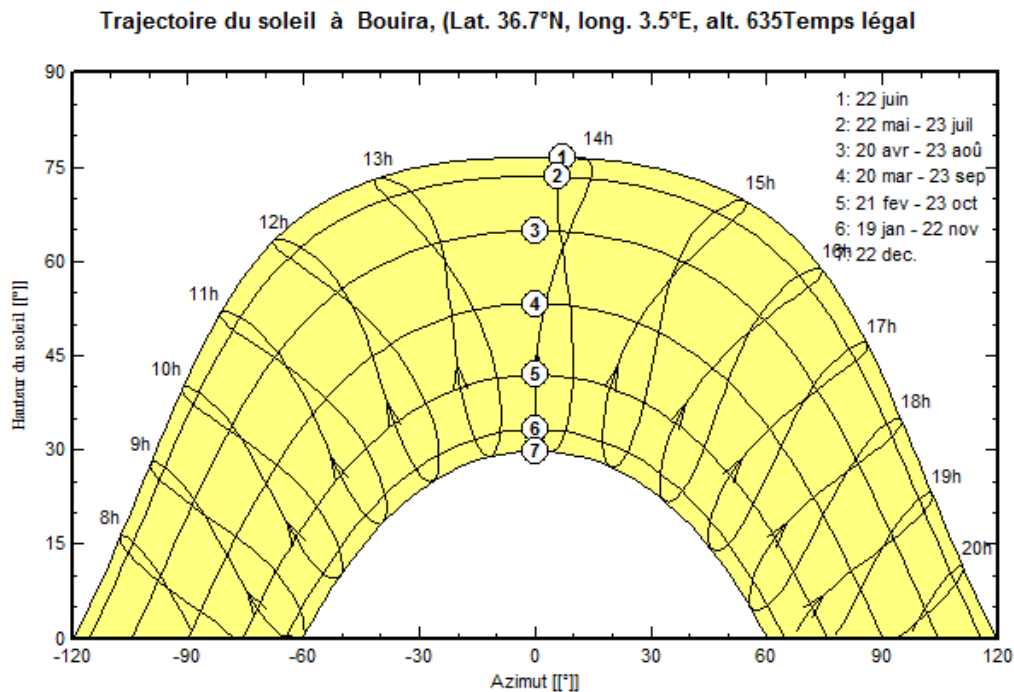


Figure (IV.5): Trajectoire du soleil à Bouira [35].

### IV.1.3 Les étapes de dimensionnement de l'installation

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage PV sont :

- Evaluation des besoins en eau.
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire.
- Détermination de l'énergie solaire disponible sur le site de l'étude.
- Choix des composants.

#### IV.1.3.1 Evaluation des besoins en eau

- La détermination des besoins en eau pour la consommation d'une population donnée dépend essentiellement de son mode de vie.
- Les besoins en eau que l'on estime nécessaires pour les zones rurales des pays pauvres sont de l'ordre de 20 litres par personne et 30 litres par tête de bétail [36].
- Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, des facteurs météorologiques comme la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, la saison de l'année considérée et de la méthode d'irrigation.

La capacité du réservoir sera déterminée selon les besoins en eau journalières et l'autonomie requise du système.

#### **IV.1.3 .2 Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire**

Une fois on connaît le débit, le calcul de l'énergie de la pompe à travers l'application de l'équation de la dynamique permet d'avoir la puissance hydraulique de la pompe exprimée en Watts à partir de la relation :

$$P_h = E_p \cdot Q_v \quad (IV.1)$$

Où:

$E_p$  : Energie hydraulique de la pompe, exprimée en Pascal;

$Q_v$ : Débit volumique ( $m^3/s$ ).

#### **IV.1.3.3 Détermination de l'énergie solaire disponible**

La méthode de dimensionnement utilisée est basée sur les calculs des valeurs moyennes journalières mensuelles de l'irradiation solaire disponible à l'inclinaison  $\beta$  des modules photovoltaïques (PV) par rapport au plan horizontal. Ce dernier doit se faire de manière à optimiser la conversion de l'énergie solaire en électrique. [11]

Dans notre calcul, on va utiliser un système fixe orienté vers une direction et inclinaison données ; le système de poursuite n'est pas traité dans cette étude.

#### **IV.1.3.4 Choix des composants**

Le dimensionnement (Design) de tout système est sujet à plusieurs contraintes technologiques souvent variables et contradictoires, amenant dans la plupart des cas à des compromis et des itérations pour parvenir à les satisfaire.

##### **a) Choix de réservoir d'eau**

Le choix de l'emplacement est un compromis entre les contraintes suivantes :

- Être le plus près possible de la zone à alimenter.
- Se situer au point le plus haut lorsqu'on s'éloigne de la zone à desservir.
- Les contraintes d'ordre économique.

### b) Choix de groupe motopompe

Le choix d'une pompe doit répondre aux calculs hydrauliques imposés par les besoins exprimés. Il se fait en consultant les catalogues des constructeurs en fonction de :

- Le débit : fourni par une pompe est la quantité d'eau qu'elle refoule durant un intervalle de temps donné. En pompage solaire, le débit est souvent exprimé en m<sup>3</sup>/h.
- Le rendement de la pompe.
- La hauteur manométrique (HMT) : à laquelle la pompe devra refouler celle-ci est majorée par des pertes de charge et de la pression de refoulement dans la conduite . Cette hauteur peut être calculée comme suit:

$$HMT = H_g + \Delta H \quad (IV.2)$$

$H_g$  : Hauteur géométrique (m) entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation (voir Figure IV.6). Elle est calculée par la formule suivante :

$$H_g = A + B + C \quad (IV.3)$$

### c) Choix de Convertisseur DC/AC (Onduleur)

Le rôle de l'onduleur est pour la conversion d'un CC provenant des panneaux en courant alternatif (AC) utilisable par la pompe.

Le choix de l'onduleur dépend des caractéristiques électriques de la pompe alimentée (puissance, tension).

## IV-2 Logique de calcul et dimensionnement

Notre logique de dimensionnement commence par la détermination des besoins en eau exprimés en mètres cubes en une journée. Le volume est fixé à  $90\text{m}^3$ .

En tablant sur un pompage continu pendant 05 heures (qui est une moyenne acceptable par rapport à l'ensoleillement de la région considérée), le débit de la pompe doit être autour de  $18\text{ m}^3/\text{hr}$ .

Le volume journalier, ainsi défini, permet de dimensionner le réservoir, dont la dimension importante est la hauteur car c'est elle qui conditionne la hauteur manométrique totale et par conséquent la puissance de la pompe.

L'autre point important est la profondeur du puits et la hauteur d'aspiration de la pompe.

La position de la pompe par rapport à la surface libre est un point crucial. Il faut éviter que la vitesse d'aspiration de la pompe l'emporte sur la vitesse d'alimentation du puits par les nappes phréatiques.

Ceci est hors de notre portée. Par conséquent, on suppose que l'eau se renouvelle automatiquement et rapidement au fur et à mesure du pompage et que le niveau de l'eau reste stationnaire.

Cette hypothèse permet d'appliquer la loi de la dynamique des fluides avec des hauteurs fixes. Le deuxième point important dans le dimensionnement est la minimisation des différentes pertes de charge :

a- Cas des pertes de charge majeures (linéaires) : on les réduit de trois façons :

- En réduisant les longueurs (E) et (A) ; (E) est imposée par la position du réservoir par rapport au puits. Ça dépend de plusieurs paramètres tels que la position du récepteur par rapport au puits et les mesures de sécurité imposées sur le site.

(A) est imposée par la hauteur du réservoir, moins le rapport d'aspect du réservoir est petit, moins est (A).

- Le diamètre de la conduite est aussi un paramètre important, l'augmentation du diamètre fait diminuer la perte de charge majeure mais dans le rapport  $L/D$  (rapport d'aspect ou allongement de la conduite).

---

- En choisissant le PVC comme matériau de la conduite ; en effet le PVC est caractérisée par sa rugosité très réduite (pratiquement lisse) et son prix. La résistance mécanique ne pose pas de problèmes pour les applications de pompage hydraulique.
- b- Cas des pertes de charge mineures (singulières) : on les réduit en minimisant le nombre de singularités (dans notre cas les coudes).

En tenant compte de toutes cette logique et en utilisant certaines données concernant les puits au niveau du site de Bouira (par ex : une profondeur moyenne de 40 m et un diamètre moyen de 2.5 m), nous avons utilisé le logiciel Autocad pour tracer le schéma complet (puits, conduites, réservoir) qui nous a permis de définir toutes les hauteurs et longueurs qui seront injectées dans les différentes équations permettant de calculer la puissance de la pompe (figure IV.6).

La détermination de la puissance hydraulique de la pompe nécessite l'application de l'équation de Bernoulli généralisée, en tenant compte de toutes les pertes de charges et des différentes hauteurs.

**IV.2.1 la vitesse d'écoulement:** elle est donnée en fonction du débit volumique exprimé en unités internationales ( $m^3/s$ ).

Le diamètre étant choisi arbitrairement comme une moyenne de plusieurs valeurs utilisées par des applications similaires [37]. Dans notre cas, on utilise un diamètre de 63 mm.

$$v = \frac{4Q_v}{\pi D^2} \quad (IV.4)$$

$$v = \frac{4 \times 5 \times 10^{-3}}{3.14 \times 0,063^2} = 1.60$$

$$v = 1.60m/s$$

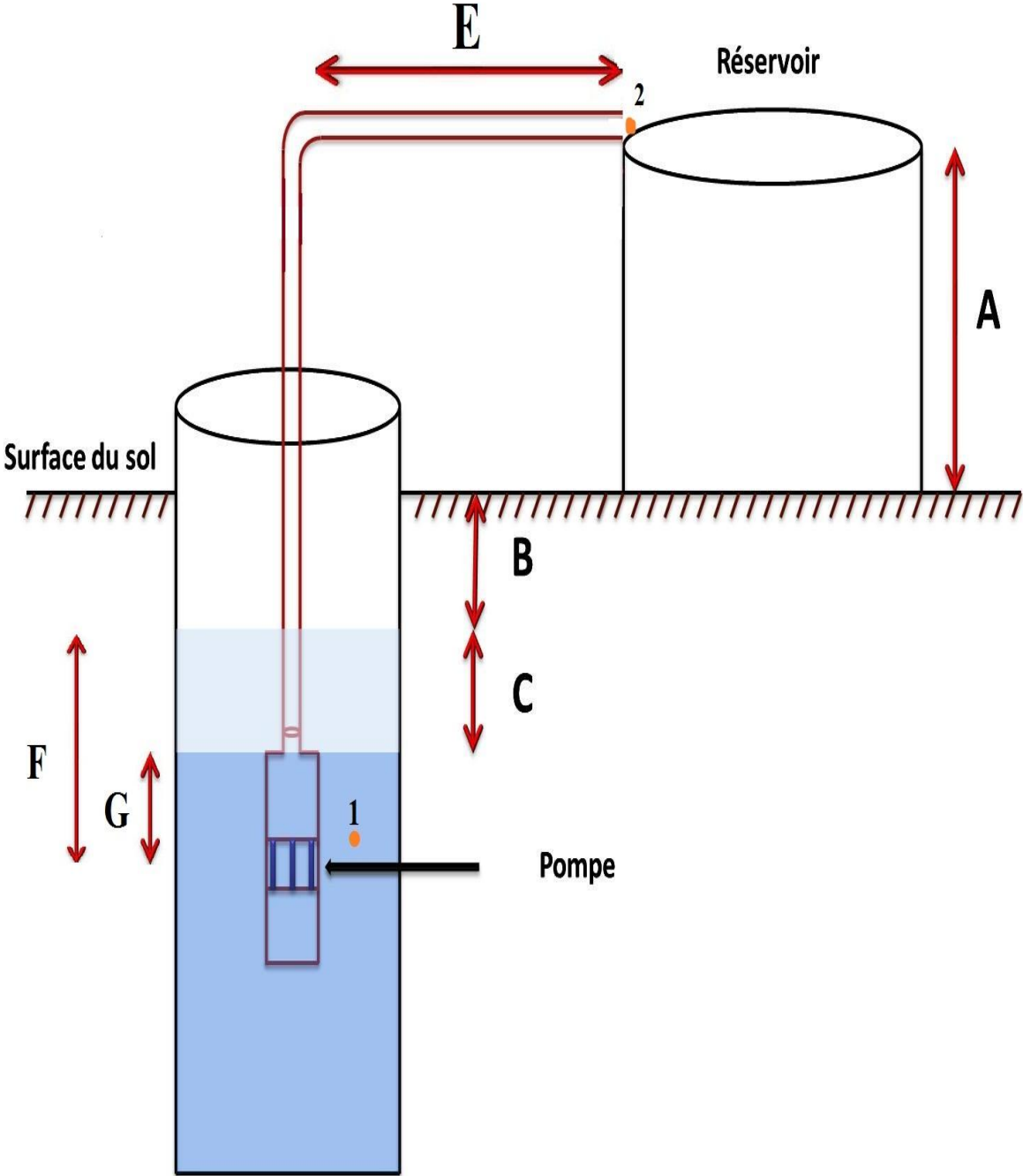


Figure (IV.6) : Schéma et dimensions de l'installation hydraulique (Puits, pompe, conduites et Réservoir)

**IV.2.2 Le nombre de Reynolds** : basé sur le diamètre de la conduite circulaire D, il est donné par :

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} \quad (IV.5)$$

$$Re = \frac{1.60 \times 0,063}{10^{-6}} = 1.008 \times 10^5$$

$$Re = 1.008 \times 10^5$$

L'écoulement est turbulent ( $Re > Re_c = 2000$ ).

Pour un écoulement turbulent dans une conduite rugueuse, le coefficient de perte de charge majeure ou coefficient de frottement est obtenu à partir de l'analyse dimensionnelle (abaque de Moody), figure IV.7

La rugosité du PVC est égale à : [38]

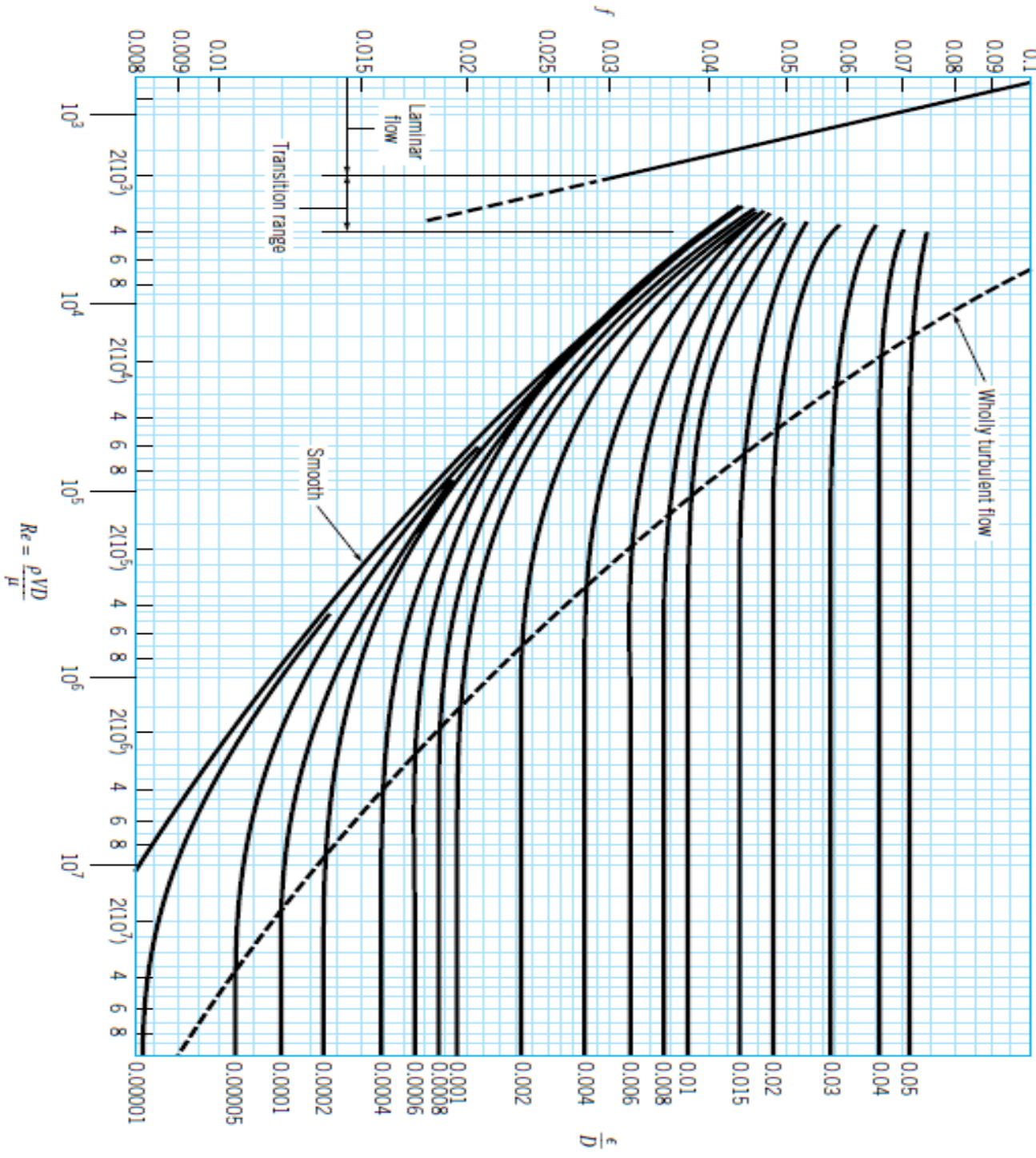
$$\varepsilon = 0,0015 \times 10^{-3} \text{ m}$$

En utilisant le diamètre de la conduite, on aura la rugosité relative :

$$\frac{\varepsilon}{d} = \frac{0.0015 \times 10^{-3}}{0.063} = 0.0000238$$

L'utilisation de l'abaque de Moody pour le couple Reynolds et rugosité relative donne un coefficient :

$$\lambda = 0.018$$



Figure(IV.7) : Abaque de Moody.



### IV.2.3 L'énergie de la pompe

L'application de l'équation de Bernoulli généralisée entre les deux points extrêmes de l'installation (1) et (2) de la figure IV.6 donne :

$$P_1 + \rho gh_1 + \rho \frac{V_1^2}{2} + E_p = P_2 + \rho gh_2 + \rho \frac{V_2^2}{2} + \Delta H \quad (\text{IV.6})$$

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2$$

$E_p$  : énergie de la pompe [Pa].

$\Delta H_1$  : les pertes de charges majeures.

$\Delta H_2$  : Les pertes de charge mineure.

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2} \quad (\text{IV.7})$$

$$\Delta H_2 = \xi \frac{\rho V^2}{2} \quad (\text{IV.8})$$

➤ **Les pertes de charge majeures**

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{\rho L}{D} \frac{v^2}{2} = 12.43 \times 10^3 \text{ Pa}$$

➤ **Les pertes de charge mineures**

$$\Delta H_2 = \xi \frac{V^2}{2g}$$

$\xi$  est le coefficient de perte de charge mineure. Egal dans notre cas d'un coude à 90° à 1,5.

$$\Delta H_2 = \xi \frac{\rho V^2}{2} = 1.920 \times 10^3 \text{ pa}$$

En tenant compte des différentes hypothèses (puits de grandes dimensions ;  $V_1 = 0$  et tuyau de refoulement débouchant à l'atmosphère  $P_2 = P_{\text{atm}}$ ), et en remplaçant  $P_1$  par l'équation de Pascal ( $P_1 = P_{\text{atm}} + \rho g F$ ), l'équation IV.6 se réduit à :

$$P_1 + \rho g h_1 + \rho \frac{V_1^2}{2} + E_p = P_2 + \rho g h_2 + \rho \frac{V_2^2}{2} + \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} + \xi \frac{\rho V^2}{2}$$

$$h_2 = A + B + C + G \text{ (figure IV.6)}$$

Avec:  $A = 7 \text{ m}$ ;  $B = 12 \text{ m}$ ;  $C = 11 \text{ m}$ ;  $G = 0.676 \text{ m}$ ;  $F = 11.676 \text{ m}$ .

$V_2 =$  vitesse dans la conduit =  $V$

$$P_{\text{atm}} + \rho g F + \rho g h_1 + E_p = P_{\text{atm}} + \rho g (A + B + C + G) + \rho \frac{V^2}{2} + \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} + \xi \frac{\rho V^2}{2}$$

$$E_p = \rho g (A + B + C + G) - \rho g F + \rho \frac{V^2}{2} + \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} + \xi \frac{\rho V^2}{2}$$

Donc l'énergie hydraulique de la pompe est égale à :

$$E_p = 202020 \text{ Pa}$$

**IV.2.4 La puissance hydraulique:** exprimée par la relation IV.1 :

$$P_h = E_p \cdot Q_v$$

$$P_h = 1.010 \times 10^3 \text{ W}$$

Une fois, la puissance hydraulique connue, on va choisir une pompe disponible et répondant à notre cas. Le tableau suivant donne les caractéristiques de la pompe **SPERONI** répondant le

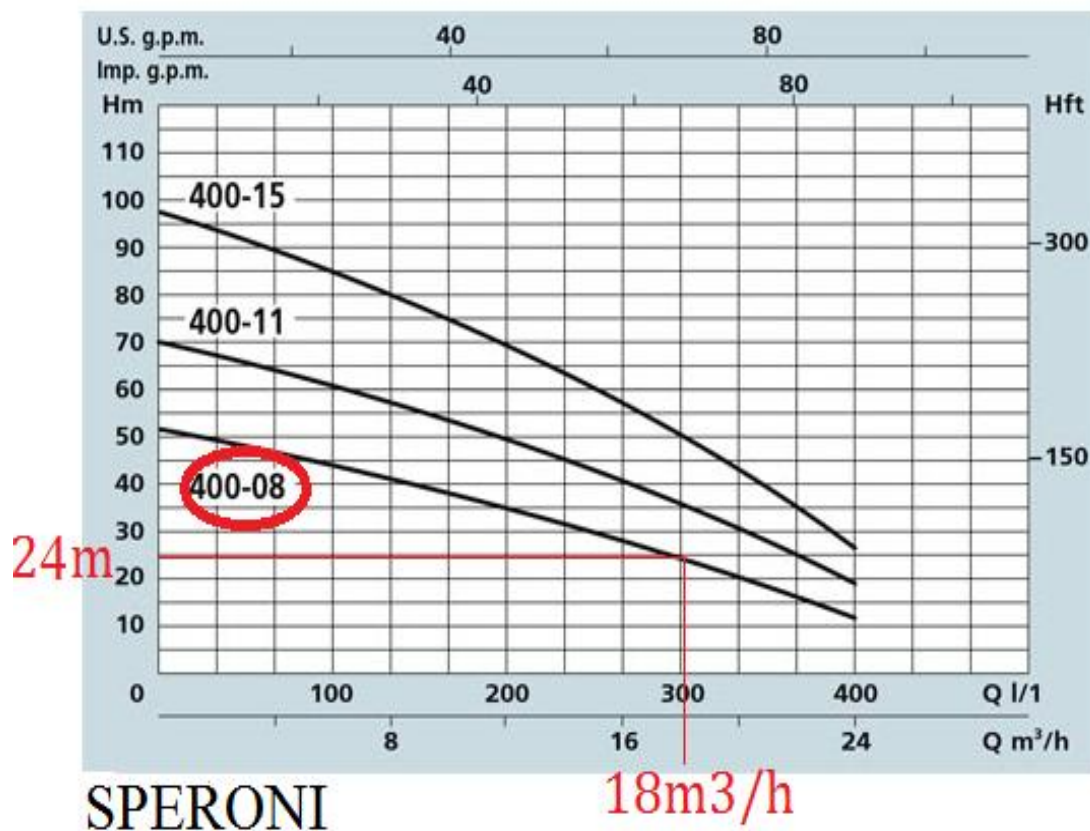
---

mieux aux conditions de débit et hauteur exigés par le cas étudié. La pompe SPT 400-08 est la mieux adaptée pour notre cas d'après le tableau IV.4 et la figure IV.8.

Les dimensions de la pompe sont données en annexe I.

Type de Pompe	Puissance (KW)	Débit (m <sup>3</sup> /h)	Hauteur (m)
SPT 400-08	2.2	18	24
SPT 400-11	3	16	41
SPT 400-15	4	22	36

*Tableau (IV.4):* Caractéristiques techniques de la pompe SPERONI.



*Figure (IV.8) :* Courbes Hydrauliques des pompes SPERONI

#### IV.2.5 La puissance absorbée par la pompe (énergie électrique)

La puissance de la pompe choisie d'après le tableau (IV.4) est de l'ordre de 2200 W.

#### IV.2.6 Estimation de la consommation

La première étape à suivre lors du dimensionnement d'une installation photovoltaïque, est l'estimation de la consommation d'électricité. Il faut donc connaître la puissance unitaire de chaque appareil utilisé ainsi que sa durée d'utilisation. Afin de réduire les dépenses énergétiques, il est conseillé de choisir les appareils dont la consommation est la plus faible possible.

Pour déterminer l'énergie consommée nécessaire par jour (Wh/jour), on multiplie la puissance (W) de la pompe par sa durée de fonctionnement (h /jour), sachant que la consommation totale d'une application calculée en tenant compte du rendement de l'onduleur s'il y a des charges alternatives. [18]

$$E_c = E_{DC} + \frac{E_{AC}}{\eta_{ond}} = (\sum P_i * t_i)_{DC} + \frac{(\sum P_i * t_i)_{AC}}{\eta_{ond}} \quad (IV.9)$$

$E_c$  [Wh/jour] : Energie journalière consommée par l'installation.

$E_{DC}$  [Wh/jour] : Energie journalière consommée par les charges DC.

$E_{AC}$  [Wh/jour] : Energie journalière consommée par les charges AC.

$\eta_{ond}$  : Rendement de l'onduleur.

$P_i$  [W] : Puissance de l'équipement.

$t_i$  [h] : Durée d'utilisation de l'équipement.

#### IV.2.7 Estimation de l'irradiation journalière moyenne

$$G_{moy} = \sum G_i T_i \quad (IV.10)$$

$G_{\text{moy}}$  [KWh/m<sup>2</sup>\*jour] : Irradiation journalière du mois le plus défavorable.

$G_i$  [KW/m<sup>2</sup>] : Irradiation horaire.

$T_i$  [h] : Durée d'irradiation.

➤ **Convertisseur DC/AC (Onduleur)**

Le rôle de l'onduleur est la conversion d'un CC provenant des panneaux en courant alternatif (AC). Dans notre cas, on prend un CC de 48 V qui doit être convertie en 220 V utilisé par le système moto-pompe.

Le choix de l'onduleur dépend des caractéristiques électriques de la pompe alimentée (puissance, tension). Pour notre étude le convertisseur qui répond mieux à ces conditions a les caractéristiques suivantes qui sont présentées dans le tableau suivant :

Paramètres	valeurs
Tension d'entrée (Volt)	48
Tension de sortie (Volt)	220
Puissance(W)	3500
Fréquence (Hz)	50
Le rendement	0.95

*Tableau (IV.5):* Caractéristiques électriques de l'Onduleur.

#### IV.2.8 Détermination de l'énergie consommée nécessaire par jour (la pompe)

L'énergie consommée par jour par la pompe est donnée par la relation suivante :

$$E_C = \frac{(P \times t)_{AC}}{\eta_{\text{ond}}} \quad (IV.11)$$

Où  $t$  est temps d'utilisation journalier et  $P$  est la puissance électrique d'entrée (2200W), mesurée en  $W$  et donnée par la fiche technique de la pompe choisie.

Le temps d'utilisation est fixé à 05 heures d'après le besoins de départ et le volume du réservoir.

Donc l'énergie consommée par la pompe par jour est:

$$E_c = \frac{2200 \times 5}{0.95} = 11578$$

$$E_c = 11578(\text{Wh} / \text{j}).$$

### IV.2.9 Dimensionnement du générateur PV

Un générateur photovoltaïque est un ensemble des panneaux dont l'association peut être en série et en parallèle. Il permet une conversion convenable de l'énergie solaire en énergie électrique sous forme de tension et de courant continu variable selon l'influence de l'éclairement (l'irradiation) et la température.

La puissance du rayonnement solaire sur la terre varie de  $0\text{W}/\text{m}^2$  jusqu'à  $1000\text{W}/\text{m}^2$ .

Le dimensionnement consiste à déterminer le type de cellules, et le nombre et l'association des modules photovoltaïques qui doivent être installés pour assurer les besoins en électricité, L'orientation des panneaux est aussi importante pour profiter le maximum du rayonnement solaire et pour un nettoyage et une maintenance facile des panneaux.

Dans notre cas on choisira une inclinaison de  $36.38^\circ\text{N}$  par rapport à l'horizontale (latitude du lieu). La face des panneaux doit être orientée vers le sud, pour profiter du soleil toute la journée.

Pour déterminer le nombre, il faut:

#### IV.2.9.1 Estimation de la puissance crête du générateur PV

La puissance crête du générateur PV à installer ( $P_{\text{crête}}$ ), est liée directement à l'irradiation solaire du lieu ( $G$ ) et à la consommation journalière ( $E_c$ ). Cette dernière est calculée de façon à satisfaire la consommation pendant la période la plus défavorable. Elle est donnée par l'équation suivante : [18]

$$P_{\text{crête}} = \frac{E_c}{K \times G_{\text{moy}}} \quad (\text{IV.12})$$

Avec :

$P_{\text{crête}}$  [ $W_c$ ] : la puissance crête du générateur PV.

$E_c$  [ $Wh/j$ ] : énergie journalière consommée par l'installation.

$G_{\text{moy}}$  [ $KWh/m^2 \cdot \text{jour}$ ] : irradiation journalière moyenne du mois défavorable (Décembre), on prend la valeur 2.4 dans le reste des calculs [18]

$K$  : Coefficient correcteur, généralement compris entre 0.55 et 0.75. Dans notre calcul, on prend la moyenne qui est égale à 0.65

Ceci donne une puissance crête :

$$P_{\text{crête}} = \frac{11578.94}{0.65 \times 2.4} = 7422.39$$

$$P_{\text{crête}} = 7422.39 (W_c)$$

#### IV.2.9.2 Détermination du nombre de modules photovoltaïques

Une fois la puissance crête du générateur PV est déterminée, on peut facilement déterminer le nombre de modules PV à installer. Le nombre de panneaux utilisés est lié à la tension de charge du générateur PV ( $V_{\text{ch}}$ ), à la puissance unitaire des panneaux utilisée ( $P_c$ ) et à la tension nominale de ces derniers ( $V_M$ ).

Pour ce qui est du type de cellules, On utilise les cellules silicium monocristallines (Annexe II). C'est des cellules ayant un très bon rendement et une durée de vie importante (chapitre II).

Pour ce qui est du nombre «  $N_M$  », il est calculé par la relation suivante [18] :

$$N_M = \frac{P_{crête}}{P_c} \quad (IV.13)$$

La puissance d'un module est donnée par la relation suivante :

$$P_c = U.I$$

Avec :

$I$  : Le courant maximal du module (A).

$U$  : La tension maximale du module (V).

Donc :

$$P_c = 30 \times 8.32 = 250$$

$$P_c = 250 \text{ (Wc)}$$

Le nombre total de modules est alors :

$$N_M = \frac{7422.39}{250} = 29.68$$

On choisit le nombre  $N_M = 30$  modules

Pour l'association des modules, le nombre des modules connectés en série  $N_{MS}$  est obtenu à partir de la relation suivante:[11]

$$N_{MS} = \frac{V_{Ch}}{V_M} \quad (IV. 14)$$



$V_{Ch}$  : La tension nominale de la charge (l'onduleur) en volt.

$V_M$  : La tension nominale du module en volt.

$$N_{MS} = \frac{48}{30} = 2$$

$$N_{MS} = 2$$

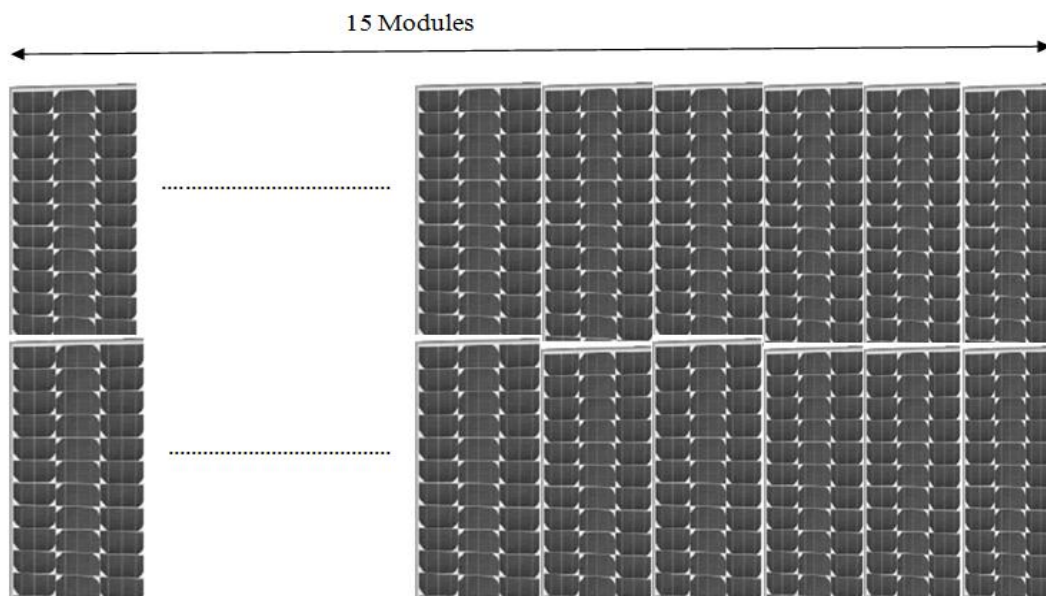
Le nombre des modules connectés en parallèle  $N_{MP}$  est donné par la formule suivante:[11]

$$N_{MP} = \frac{N_M}{N_{MS}} \quad (IV.15)$$

$$N_{MP} = \frac{30}{2} = 15$$

$$N_{MP} = 15$$

La figure IV.9 donne la configuration des panneaux solaires obtenue



**Figure (IV.9):** Configuration du générateur solaire PV résultant

### IV.3 Influence des paramètres externes sur le fonctionnement du panneau solaire

Le panneau solaire est influencé par l'irradiation et la température. Les variations de ces deux dernières peuvent influencer le bon fonctionnement du panneau à travers la variation du courant et de la tension de sortie.

Dans cette partie, on va présenter les caractéristiques I-V et puissance du panneau en fonction de la plage de température et l'irradiation incidente sur le site d'étude.

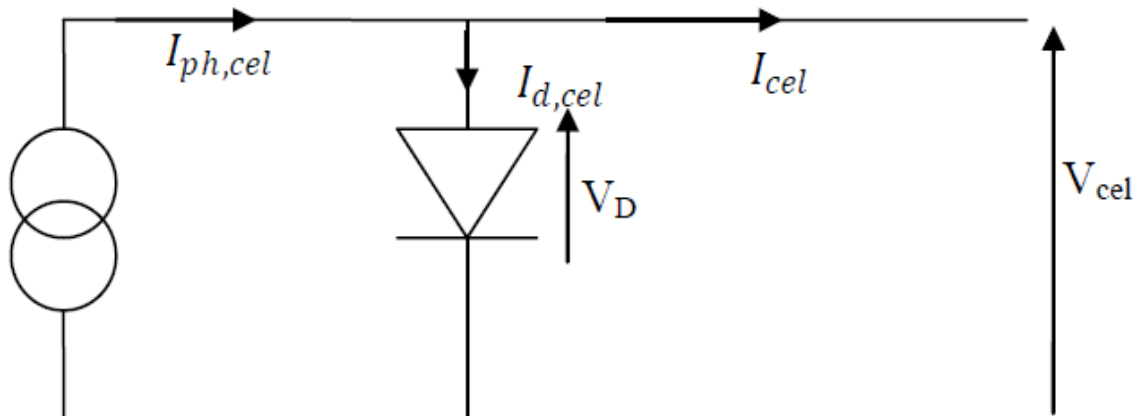
La connaissance des équations régissant les panneaux est importante pour arriver à ce but.

La simulation qui va suivre traite du cas d'un modèle d'une cellule réelle. En effet, le modèle d'une cellule idéale existe aussi [18].

#### IV.3.1 Le modèle simulé (modèle à une diode)

##### ➤ Modèle d'une cellule idéale

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode figure (IV.10). [18]



Figure(IV.10): Modèle de la cellule idéale.

Après la loi de nœud:

$$I_{cel} = I_{ph,cel} - I_{d,cel} \quad (IV.16)$$

$I_{cel}$  : Le courant délivré par une cellule ;

$I_{ph,cel}$  : Le courant photoélectrique d'une cellule;

$I_{d,cel}$  : Le courant dans la diode.

Le courant de la diode est donné par la relation :

$$I_{d,cel} = I_{0,cel} \left( e^{\frac{q \cdot V_D}{a \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (IV.17)$$

Avec :

$I_{0,cel}$  [A]: Courant de saturation de la diode ;

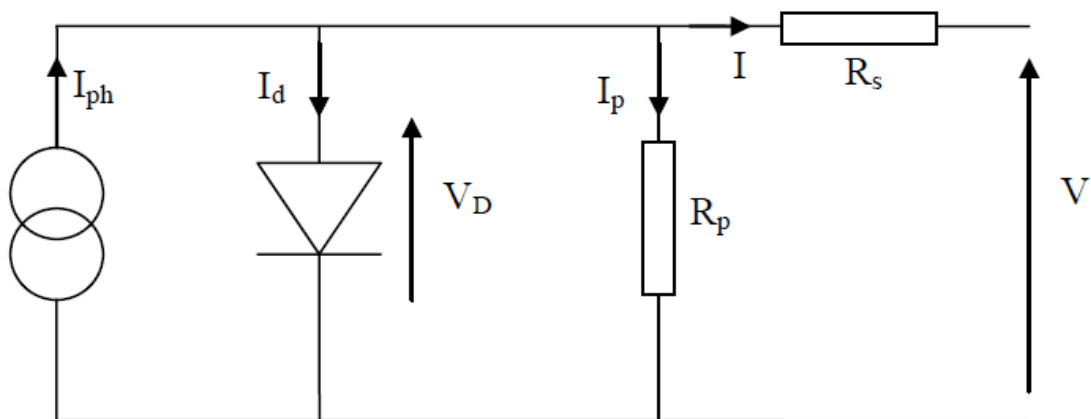
$a$  : Le facteur d'idéalité de la jonction ;

$k$  [J/K]: Constante de Boltzmann,  $k=1.38e-23$  [J/K] ;

$q$  [C]: La charge de l'électron,  $q=1.6 e-19$  [C] ;

$T$  [K]: La température de la jonction.

➤ **Modèle d'une cellule réelle**



**Figure (IV.11)** : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque réel. [11]

Une cellule PV peut se modéliser à partir de l'équation définissant le comportement statique de la jonction PN d'une diode classique. Et aussi la figure (IV.11) illustre le schéma électrique équivalent d'une cellule PV réelle. Dans cette équation, on prend en compte le

courant de court-circuit et les différentes résistances pour les pertes. En statique, le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base de silicium.

Le courant de sortie  $I$  de la cellule PV pour un flux incident et une Température fixe est calculé en appliquant la loi de Kirchhoff aux nœuds sur le circuit équivalent représenté sur la figure précédente on aura:

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (IV.18)$$

$$I_p = \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (IV.19)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\left( \frac{V + R_s I}{a V_T} \right)} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (IV.20)$$

Avec :

$$V_T = \frac{n_s K T}{q}$$

$V_T$ : Potentiel thermique ;

$n_s$ : Nombre de cellules en Série du module PV.

L'équation (IV.20) contient des paramètres ( $I_{ph}$ ,  $I_0$ ,  $a$ ,  $R_s$  et  $R_p$ ) qui doivent être déterminés pour résoudre cette équation et déterminer ainsi la caractéristique  $I = f(V)$  et aussi  $P = f(V)$ . Ces paramètres peuvent être déterminés de la manière suivante:

#### a) Courant photovoltaïque ( $I_{ph}$ )

L'expression de courant photoélectrique aux conditions de fonctionnement est donnée par la formule suivante :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_n} [I_{ph,n} + K_I (T - T_n)] \quad (IV.21)$$

Où :

$I_{ph}$  [A] : Courant photoélectrique aux conditions de fonctionnement ;

$I_{ph,n}$  [A]: Courant photoélectrique aux conditions standards ( $G_n=1000 W/m^2$ ,  $T_n=25^\circ C$ );

$G_n$  [ $W/m^2$ ] : Irradiation solaire standard ( $G_n =1000 W/m^2$ ) ;

$G$  [ $W/m^2$ ] : Irradiation solaire de fonctionnement;

$K_I$  [ $A/^\circ C$ ]: Coefficient de la température du courant de court-circuit ;

$T$  [ $^\circ C$ ] : Température de fonctionnement ;

$T_n$  [ $^\circ C$ ] : Température standard ( $T_n=25^\circ C$ ).

( $I_{cc}$ , et  $K_I$ ) sont donnés par le fabricant (dans notre cas silicium monocristallin).

Avec le courant photovoltaïque  $I_{Ph,n}$  dans les conditions standard est donné par la relation :

$$I_{Ph,n} = \frac{R_p}{R_s + R_p} I_{cc,n} \quad (IV.22)$$

$R_p$  : La résistance en parallèle ;

$R_s$  : La résistance en Série ;

$I_{cc,n}$  : Le courant de court circuit.

#### b) Courant de Saturation( $I_0$ )

Dans les conditions de fonctionnement, le courant de saturation est donné par :

$$I_0 = I_{0,n} * \left(\frac{T_n}{T}\right)^3 \exp\left[\frac{qE_g}{ak} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (IV.23)$$

$E_g$ : Energie de gap du semi-conducteur ( $E_g=1.12$  eV pour le silicium).

$I_{0,n}$ : Courant de saturation aux conditions standards ;

Pour avoir l'expression du ce dernier ( $I_{0,n}$ ), on remplace par les conditions du point du circuit ouvert ( $V_{OC,n}$ , 0) dans l'équation (IV.19):

$$I_{0,n} = \frac{I_{ph,n}}{\exp\left(\frac{V_{oc,n}}{aV_{T,n}}\right) - 1} \quad (IV.24)$$

$a$  : Le facteur d'idéalité, Généralement, ce paramètre est compris entre (1 et 1.5). Dans notre travail, nous avons pris  $a=1$

$V_{oc,n}$  : Tension du circuit ouvert aux conditions standards.

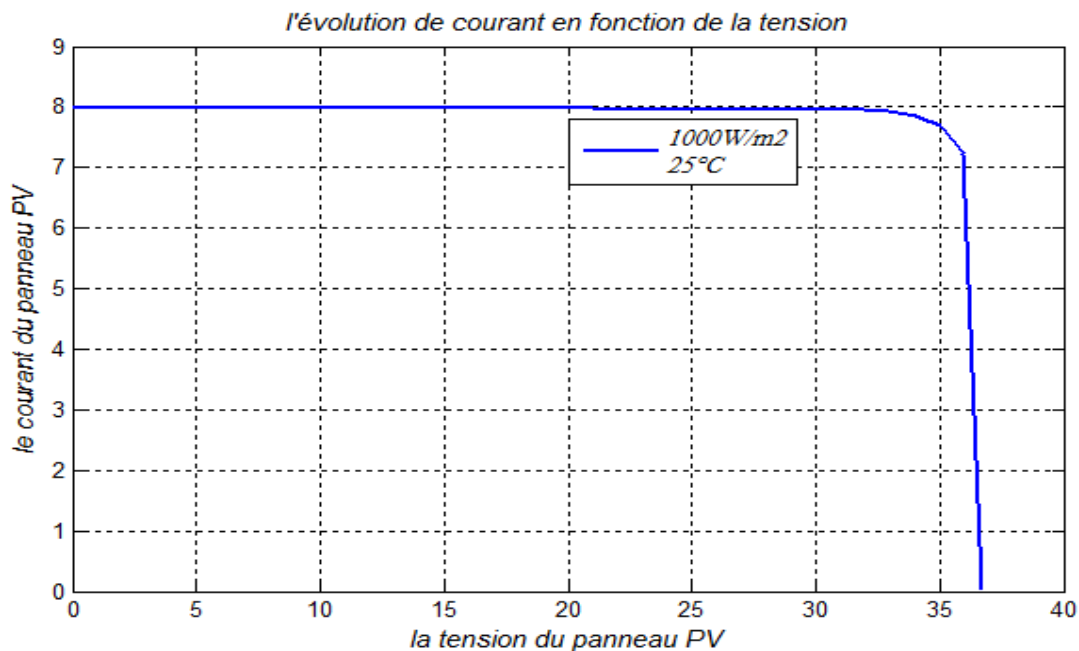
$V_{T,n}$  : Le potentiel Thermique aux conditions standard est donné par :

$$V_{Tn} = \frac{n_s k T_n}{q}$$

La simulation de ces équations est réalisée par le logiciel Matlab.

### IV.3.2 L'évolution du courant en fonction de la tension

On commence par tracer l'évolution se fait sous les conditions standard (l'ensoleillement  $1000W/m^2$ , la Température  $25^\circ C$ ). On trace dans la figure IV.12, le graphe de  $I=f(V)$  :



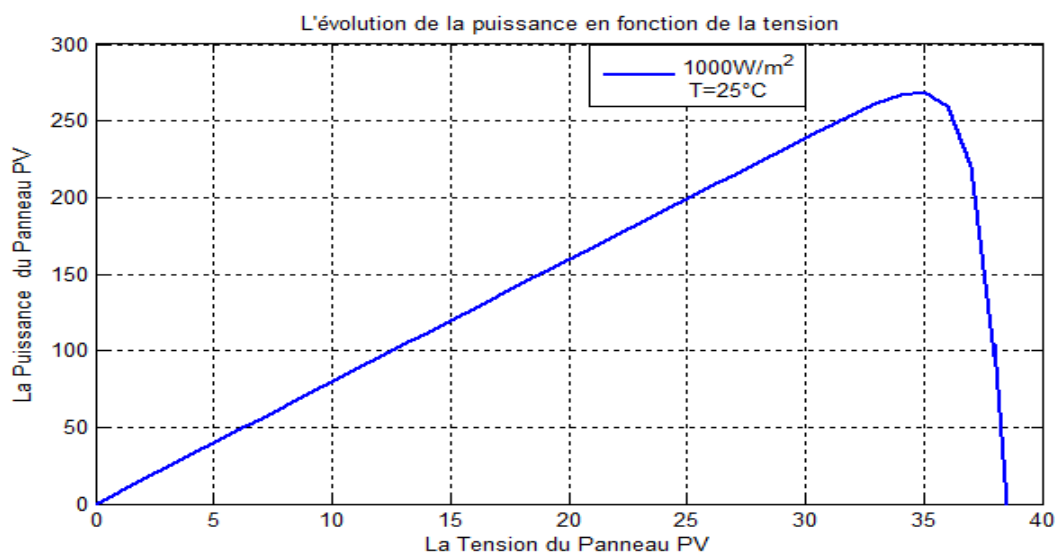
**Figure (IV.12):** Caractéristique I-V du panneau dans les conditions standard.

On remarque :

- Quand la tension de la cellule est maximale le courant est minimal (tension en circuit ouvert).
- Quand le courant de la cellule est maximum la tension est minimale (courant de court circuit).
- Donc la cellule a des caractéristiques strictement non linéaires.

### IV.3.3 Evolution de la puissance en fonction de la tension

Avec les mêmes conditions standards, le résultat de la simulation de l'évolution de la puissance donne le graphe  $P=f(V)$  suivant (figure IV.13):



**Figure (IV.13):** l'évolution de la puissance en fonction de la tension dans les conditions standard.

Ce graphe montre que dans les conditions standard de Température et d'ensoleillement la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque est optimale.

### IV.3.4 Influence de la température sur les caractéristiques externes du module

Les deux figures ci-dessous présentent les caractéristiques I-V et PV pour différentes températures à une irradiation fixe ( $G_n = 1000 \text{ W/m}^2$ ). La simulation donne les résultats suivants :

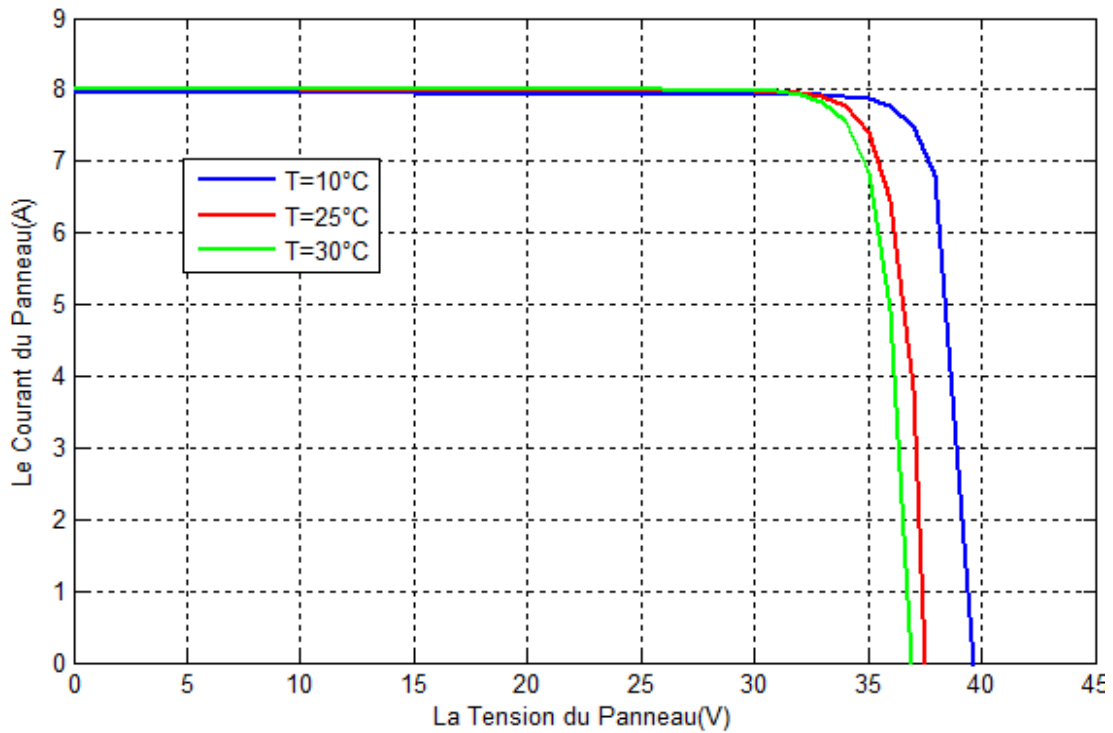


Figure (IV.14): Influence de la température sur la caractéristique I-V.

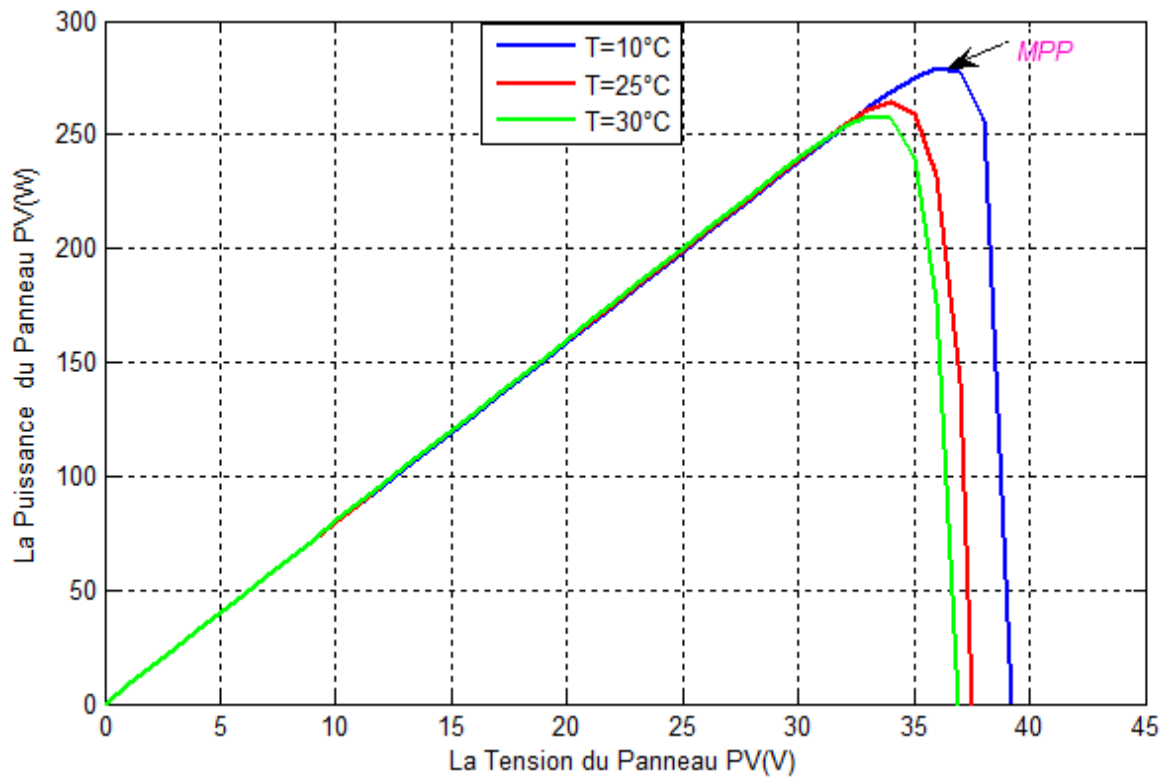


Figure (IV.15): Influence de la température sur la caractéristique P-V.

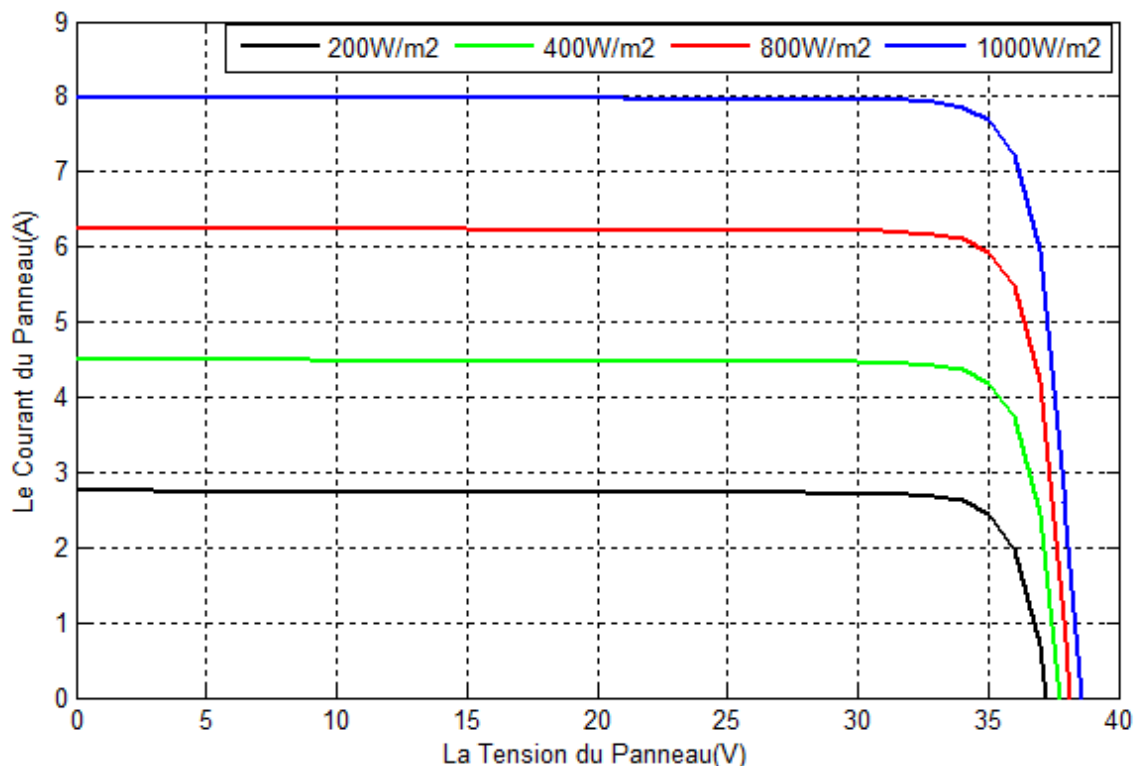


A partir des résultats de la simulation (IV.14) et (IV.15), on peut dire que:

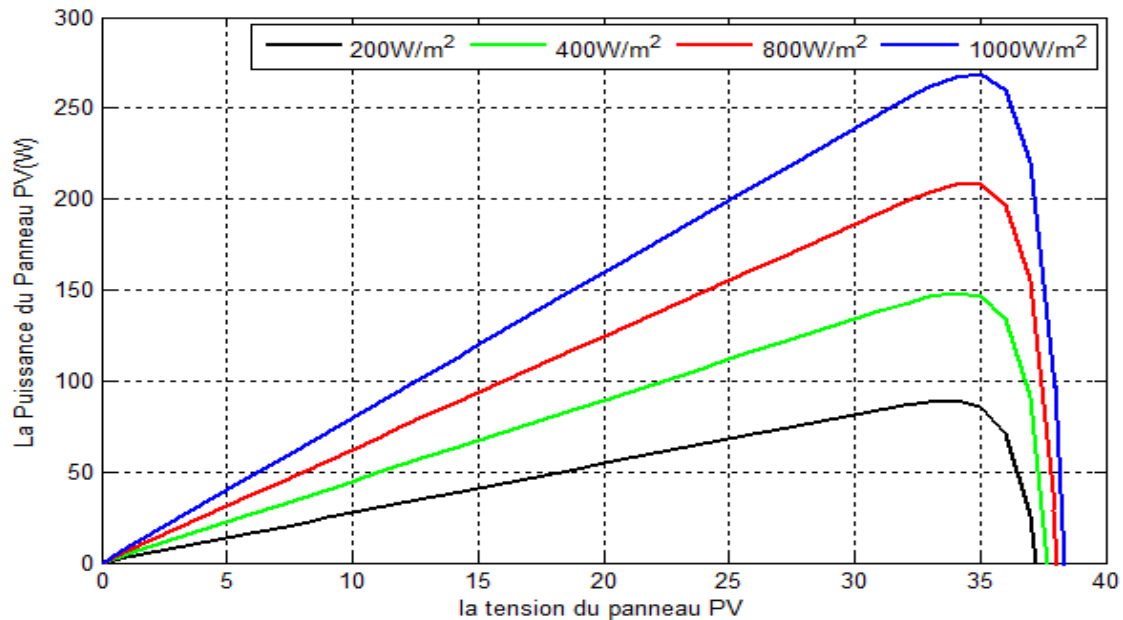
- la variation du courant de court-circuit est marginale avec l'augmentation de la Température dans l'intervalle considéré et qui concerne la plage de température moyenne des mois (figure IV.3). Les courbes sont confondues pour l'intervalle de la tension d'utilisation. Ceci montre que la température n'a pas une grande influence sur le courant de court-circuit, généralement l'influence de celle-ci est souvent négligée.
- On peut remarquer aussi sur la figure (IV.15) que pour des températures élevées, le point de puissance maximale produite par le panneau diminue légèrement.

### IV.3.5 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques externes du module.

Pour faire une étude sur l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques du panneau, on fixe la température de référence ( $T_n=25^\circ\text{C}$ ) et on fait varier seulement l'éclairement, Les figures (IV.16 et IV.17) présentent des courbes pour différents niveaux d'éclairement :



**Figure (IV.16):** L'effet de l'irradiation sur la caractéristique I-V.



**Figure (IV.17):** L'effet de l'irradiation sur la caractéristique P-V.

D'après les résultats de simulation, nous remarquons que le courant de court-circuit est fortement proportionnel à l'éclairement. Par contre, la tension du circuit ouvert  $V_{oc}$  est légèrement affectée par la variation de l'éclairement, elle augmente un peu avec l'augmentation de cette dernière. Donc on peut conclure que à chaque fois on augmente l'ensoleillement la puissance augmente.

Pour une irradiation minimale de  $200 \text{ W/m}^2$ , la puissance d'un panneau est proche de 90 Watt, donc pour l'ensemble de 30 panneaux, la puissance est 2700 W. C'est une valeur nettement supérieure à la valeur à l'entrée du convertisseur, calculée sur la base de son rendement égale 0.95 et de la puissance de la moto pompe (2200 W) et dont la valeur finale est 2315 W.

Le nombre de modules étant défini, l'utilisateur a le choix d'intervenir pour les connexions en série et en parallèles suivant l'irradiation incidente.

# Conclusion Générale

### Conclusion Générale

Comme nous l'avons déjà signalé le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'un projet visant « Modélisation et dimensionnement d'un système de pompage Photovoltaïque ».

D'abord, l'énergie solaire est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite.

L'énergie solaire est une des 5 énergies renouvelables qui permet d'obtenir essentiellement de la chaleur et de l'électricité. Nous avons vu qu'à l'aide des nouvelles technologies, les panneaux solaires photovoltaïques ou thermiques, on peut obtenir de la chaleur grâce aux réactions transformant la lumière en chaleur ainsi que de l'électricité.

L'énergie solaire peut contribuer au remplacement des énergies fossiles puisqu'elle présente des intérêts positifs aux niveaux écologiste et social.

L'utilisation de l'énergie solaire dans les sites isolés pour différentes applications telles que le pompage d'eau présente un intérêt très important.

Ainsi nous avons présenté les résultats d'une étude qui a conduit au dimensionnement d'une installation de pompage photovoltaïque pour des besoins données. Nous avons présenté les différents éléments de ce système photovoltaïque qui sont : un générateur photovoltaïque, une motopompe et un onduleur.

Au début, nous avons établi une logique de design nous permettant de définir les principales variables de l'étude en tenant compte des besoins exprimés et des données disponibles sur le site de Bouira.

Ensuite, nous avons essayé de minimiser les différentes pertes ce qui permet de faire certains choix influençant surtout les dimensions, telles que les hauteurs et les longueurs des conduites.

Pour accomplir l'étude plusieurs hypothèses ont été avancées, on cite la stationnarité de l'écoulement pour pouvoir appliquer l'équation dynamique qui permet de calculer la puissance du moto pompe et par la suite le reste des éléments.

La pompe SPERONI a été choisie du fait qu'elle répond à toutes les exigences de débit, hauteur et puissance.

Selon l'étude, le générateur photovoltaïque adéquat est constitué de 30 modules photovoltaïques en silicium monocristallin choisi parmi d'autres pour ses avantages.

L'étude des générateurs photovoltaïques a permis la connaissance du comportement de ces derniers en fonction de l'éclairement et de la température et leurs effets sur les caractéristiques électriques, et par conséquent sur leur rendement.

Il est cependant important de signaler que, souvent, le calcul de la taille du générateur comporte un certain degré d'incertitude. Cette incertitude est principalement due à deux raisons essentielles : la première est liée au caractère aléatoire du rayonnement solaire qui est souvent peu connu. La deuxième est liée à l'estimation difficile des besoins d'eau demandés, car les besoins sont variables. Il est ainsi conseillé de prendre des précautions quant au choix du type de pompe et de la taille du générateur.

Enfin, cette étude nous a permis de connaître les problèmes réels de toute conception et dimensionnement, lequel est fonction de plusieurs paramètres à la fois variables et conflictuels.

# Références Bibliographiques

- [1] M. Belhadj, « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome ». Mémoire de Magister, Centre Universitaire De Bechar, Institut des Sciences Exactes, 2008.
- [2] O. M. Boukli-Hacene, « Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique » Mémoire de Magister Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen, 2011.
- [3] S. Harrouni, « cours énergie solaire », Université des Sciences et de Technologie Houari Boumediene, Alger.
- [4] Y. Bakelli, « Contribution à l'optimisation du dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome », Thèse de Doctorat en Sciences, Université Hadj Lakhdar, Batna, 2012.
- [5] T. Abdelli, « Modélisation et simulation d'une configuration optimale des cellules photovoltaïques », Mémoire de Master, Université de M'Hamed Bougara, Faculté des sciences de l'ingénieur, 2009.
- [6] D. Funk, « l'énergie solaire: Circonstances et conditions d'exploitation au Québec », présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de l'obtention du grade de Maître en environnement, université de Sherbrooke, Canada, janvier 2010.
- [7] J. Royer, le pompage photovoltaïque, Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Université d'Ottawa, 1998.
- [8] B. Flèche et D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », STI, 2007.
- [9] Z. Bendjellouli, « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire », Mémoire de Magister, université de Béchar, 2009.
- [10] A. Brooks, « Photovoltaic solar Energy », Arizona Research Institute for solar energy, 2011.
- [11] M. L. Louazene, « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université El Hadj Lakhdar, Batna, 2008.
- [12] M. Hussein « Mise en œuvre d'une méthodologie pour l'étude de rayonnement parasite basse fréquence de panneaux solaires sur des capteurs situés en zone proche », Thèse de Doctorat en Télécommunication, Université de Limoges Ecole Doctorale Science-Technologie-Santé, 2007.
- [13] R. Merahi, « Modélisation d'un dispositif MPPT pour L'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateurs photovoltaïques », Mémoire de Magister en réseaux électrique, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2010.
- [14] A. Saadi, « Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2000.

[15] N. Aoun, « Etude et modélisation des différents modèles de cellules photovoltaïques établis sur la base de valeurs nominales », Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2010.

[16] « Prime énergie .s. panneaux solaires photovoltaïques (.X) » Prime énergie 2010 – conditions et formulaire version du (15 février 2010).

[17] B. Mamri et M. Zaidi, « Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque avec pompage », Mémoire d'ingénieur en électronique, Université de Constantine, 2006.

[18] L. Ousdidene, « Etude et commande d'un système de conversion solaire-photovoltaïque dédié à l'alimentation des sites isolés », Mémoire de Magister en systèmes électrotechniques, option conditionnement de l'énergie et entraînements électriques, Ecole Militaire Polytechnique, 2014.

[19] Guide Persues, Guide des Installations photovoltaïques raccordées au réseau électrique destiné aux particuliers, Edition 2007.

[20] L. Baxerres, A. Michallet et C. Ramet, Rapport PIP, Microtransat Energie I, Partie électronique et énergétique", 2005-2006.

[21] D. Boukhers, « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque, Application au pompage », Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2007.

[22] N. Debilli, « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque », Mémoire de Magister en Electronique, Université de Constantine I, 2015.

[23] K. Rahrah, D. Rekioua, T. Rekioua, S. Bacha, « Photovoltaic pumping system in Bejaia climate with battery storage », Laboratoire de Technologie Industrielle et de l'information (LTII), Faculté de Technologie, Université de Bejaia, Algeria et G2lab INPG Grenoble, France, 2015.

[24] M. Nabil, S.M. Allam, E.M. Rashad, « Modeling and design considerations of a photovoltaic energy source feeding a synchronous reluctance motor suitable for pumping systems », Department of Electrical Engineering, Kafrelshiekh University, Egypt et Department of Electrical Power and Machines Engineering, Tanta University, Egypt, 2012.

[25] A. Meflah, « Modélisation et commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque », Mémoire de Magister. Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2011.

[26] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, « Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné à une installation photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur, Université de Ouargla, 2005.

[27] S. Diaf, « Etude et optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université de Boumerdes, 2002.

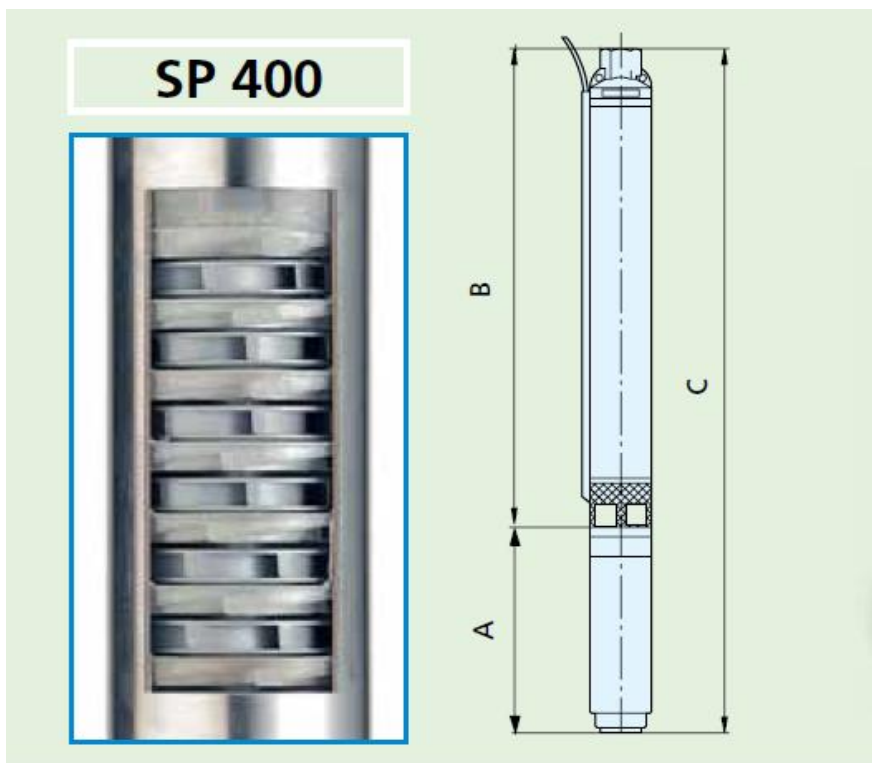


- [28] A. Betka, « Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil », Mémoire de Magister, Centre universitaire Biskra, 1997.
- [29] S. Diaf, « Expérimentation d'un système de pompage photovoltaïque sur site saharien », Mémoire d'ingénieur d'état, CDER, 1992.
- [30] M. Niang and S. Diop, « Les pompe solaires, Dimensionnement d'une station de pompage en zone maraîchère », Institut Supérieur de Technologie Industrielle-DIT électrotechnique- Electromécanique-Froid et Climatisation, 2008.
- [31] J. Hindmarsch, «Electrical machine and their applications», 4<sup>th</sup> ed, Pergamon press, New York, 1984.
- [32] K. T. Maurice, « Système Photovoltaïque : Dimensionnement pour pompage d'eau, pour une irrigation goutte-à-goutte », Université de Ouagadougou, 2007.
- [33]. Le pompage Photovoltaïque Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des technicien.
- [34]. B.Equer « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours », énergie solaire photovoltaïque ellipses 1993.
- [35] PV syst V6.40, Logiciel pour systèmes photovoltaïques, Swiss federal Office for Energy, Switzerland, 2012.
- [36] A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi « Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque », CDER et Faculté de Génie Electrique, U.S.T.H.B., Alger, 2005.
- [37] P. Caton, « Design of rural photovoltaic water pumping systems and the potential of manual array tracking for a West-African village », Solar Energy, 103, 288-302, Elsevier, 2014.
- [38] Y. Çengel and J. M. Cimbala, Fluid Mechanics, Fundamentals and Applications, McGraw Hill, 2006.

# Annexes

**Annexe I**

Tipo-Type	Dimensioni-Dimension		
	A	B	C
SPM-SPT 400-08	430	676	1106
SPT400-11	447	880	1327
SPT 400-15	555	1149	1704



## Annexe II



Module PV monocristallin

Les données nécessaires d'un module photovoltaïque de type NICE R04-250 en conditions standard (STC :  $1000\text{W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ , AM1.5) sont représentées dans les tableaux ci-dessous :

Paramètres	Valeur
La Tension de circuit ouvert $V_{CO}(\text{V})$	37.47
Le Courant de court circuit $I_{SC}(\text{A})$	8.76
La Tension maximale crête $V_m(\text{V})$	30
Le courant maximal crête $I_m(\text{A})$	8.32
La surface du module PV ( $\text{m}^2$ )	1.5

**Tableau(01):** Spécification Electrique d'un module PV.

Coefficient	Valeur
Coefficient de Température de $I_{SC}$ [ $\%/^\circ\text{K}$ ]	+0.04
Coefficient de Température de $V_{OC}$ [ $\%/^\circ\text{K}$ ]	-0.34
Coefficient de Température de $P_{MPP}$ [ $\%/^\circ\text{K}$ ]	-0.47

**Tableau(02):** Coefficients de Température d'un module PV.

## Résumé

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'apparition de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi que la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays peut couvrir certains de ses besoins énergétiques en développant le secteur des systèmes photovoltaïques, en particulier les systèmes de pompage d'eau.

Dans ce travail, on dimensionne un système de pompage photovoltaïque en partant de certains besoins en eau et en utilisant les données atmosphériques du site de l'étude (Bouira). L'application de la modélisation a permis de calculer les différentes énergies hydraulique et électrique et de dimensionner le générateur PV.

## ملخص

يعزز الموقع الجغرافي للجزائر تطوير استعمالات الطاقة الشمسية نظرا لكثافة و مدة الاشعاع الشمسي و الذي يتجاوز العشر ساعات يوميا عدة شهور. بفضل هذه الخاصيات، تستطيع بلادنا تغطية احتياجاتها الطاقوية و ذلك بتطوير مجال الأنظمة الكهروضوئية و خاصة أنظمة ضخ المياه. في هذا العمل قمنا بتصميم و حساب نظام ضخ مائي يعمل بنظام كهروضوئي و يستجيب لحاجيات خاصة باستعمال معطيات منطقة البويرة.

## Abstract

The geographical location of Algeria promotes the development and the emergence of the use of solar energy. Indeed given the importance of the intensity of radiation received and the duration of sunshine that exceeds ten hours a day for several months, our country can cover some of her energetic needs with the development of the photovoltaic Branch, especially the water pumping systems.

The main object of this work is to design a photovoltaic pumping systems with respect to water volume needs and the atmospheric data of the location under study (Bouira).

The model used allows us to calculate the different energies, hydraulic, electric as well as the dimension of the PV generator.