

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

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° :PhENR .../2020



DOMAINE : Sciences de la matière

FILIERE : Physique

OPTION : Physique Energétique
et Energies Renouvelables

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Réalisé par:

BAIOU Lamri

BOUSSAG Ammar

Intitulé

**Effet de la Température ambiante sur l'efficacité d'un Panneau solaire
photovoltaïque**

Soutenu le /... /2020 devant le jury composé de:

Ben Kherbeche Souad	Université Mohamed Boudiaf- M'sila	Président
Maayouf Si Abdallah	Université Mohamed Boudiaf- M'sila	Rapporteur
Ben Derraji Razik	Université Mohamed Boudiaf- M'sila	Examineur

Année universitaire : 2019/2020

Remerciements

Tout d'abord,

Nous remercions Dieu qui nous a aidés dans notre travail ici se termine notre voyage dans les études de master à l'Université de Mohamad Boudiaf -M'sila après cinq ans bien passés. Merci à notre université, et merci à tous nos professeurs au département de physique sans exception.

Merci à toute notre famille pour votre soutien à nous.

Nous adressons également nos sincères remerciements de tout cœur à notre mentor Maayouf Si Abdallah notre encadré qui a fourni des efforts énormes, par ses Informations ses conseils et ses encouragements.

tout comme je n'oublie pas mes amis et collègues et tous ceux qui nous ont aidés dans notre cheminement académique.

Table des Matières

Remerciement

Table des Matières.....	I
Liste des figures.....	I
Liste des Tableaux.....	I

Nomenclature.....	I
-------------------	---

<i>Introduction générale</i>	1
------------------------------------	---

CHAPITRE I: LE GISEMENT SOLAIRE

I-1 Introduction	3
I-2 Description du soleil.....	3
I-3 Spectre solaire.....	5
I-4 Mouvement de la terre.....	7
I-5 Sphère céleste.....	8
I-6 Les coordonnées géographiques terrestres.....	8
I-6.1 Longitude.....	9
I-6.2 La latitude.....	9
I-6.3 L'altitude.....	9
I-7 Les coordonnées du soleil par rapport à un observateur.....	10
I-7.1 les coordonnées équatorial.....	10
I-7.2 Déclinaison solaire.....	10
I-7.3 Angle horaire du solaire.....	11
I-7.4 Les coordonnées horizontale.....	11
I-7.5 La hauteur du soleil.....	12
I-7.6 Azimut du soleil.....	12
I-8 Les temps solaires.....	13
I-8.1 Le temps solaire vrai (TSV).....	13
I-8.2 Le temps solaire moyen (TSM).....	13
I-8.3 Le temps universel (TU).....	14
I-8.4 Temps légal (TL).....	14
I-8.5 Lever et coucher du soleil.....	14
I-8.6 La durée du jour.....	15

I-9 Angle d'incidence sur un plan.....	15
I-10 Direction des rayonnements solaires par rapport à un plan	16
I-11 Le rayonnement solaire	18
I-12 Constante Solaire.....	18
I-13 Différents types de rayonnement solaire.....	19
I-14 instrumentation de Mesure du rayonnement.....	22
I-15 Le gisement solaire en Algérie.....	23
I-16 Conclusion.....	25

CHAPII : GENERALITES SUR LES SYSTEMES

PHOTOVOLTAIQUES

II.1 Introduction.....	26
II.2 Description de la cellule solaire	26
II.3 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	27
II.4 LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES.....	29
II.4 .1 1ère génération : cellules cristallines.....	29
II.4.1.1 Silicium monocristallin.....	30
II.4.1.2 Silicium poly (ou multi-) cristallin.....	30
II.4.2 2ème génération : couches minces “thin films”.....	31
II.4.2.1 Silicium amorphe.....	31
II.4.2.2 Tellurure de cadmium (CdTe).....	32
II.4.2.3 CuInSe ₂ (CIS) et CuInGaSe (CIGS).....	33
II.4.3 3ème génération : Pérovskites, multi jonction, concentration,	34
II.4.3.1 Pérovskites.....	34
II.4.3.2 Les cellules multi-jonction.....	35
II.4.3.3 Arséniure de gallium (GaAs).....	36
II.5 EVOLUTION DE RENDEMENTS DES DIFFRENTS TYPES DE CELLULES.....	37
II.6 Schéma électrique équivalent.....	38
II.7 Paramètres des cellules photovoltaïques.....	40
II.7.1 Courant de court-circuit, I_{cc}	41
II.7.2 Tension à circuit ouvert, V_{oc}	41
II.7.3 Le maximum de puissance P_m	42
II.7.4 Facteur de forme, FF	43
II.7.5 Le rendement, η	44
II.8 Influence des paramètres sur la caractéristique courant tension.....	44
II.8.1 Influence de l'éclairement.....	44

II.8.2 influence de la température.....	45
II.9 Conditions de test des modules photovoltaïques	55
II.10 Conclusion.....	52

CHAPIII Modélisation et caractérisation d'un PV solaire

III.1. Calcul des rayonnements solaires.....	53
III.1.1 Variation temporelles des puissances solaire globale incident sur un plan horizontale.....	53
III.1.2 Effet de l'angle d'inclinaison.....	54
III.2 Caractéristiques courant-tension (I-V) d'un PV.....	55
III.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	58
III.3.1 Effet de l'éclairement solaire sur courant tension (I-V).....	59
III.3.2 Effet de la température sur I-V.....	59
III.3.3 Effet de la température sur η	61
Conclusion générale	62
Référence bibliographique.....	63

Résumé

Liste des figures

Figure I.1:Structure du soleil	5
Figure I.2:Spectre électromagnétique	6
Figure I.3:Mouvement de la terre autour du soleil.....	7
Figure I.4:Sphère Céleste.....	8
Figure I.5:Les coordonnées terrestres d'un lieu donné.....	9
Figure I.6:La déclinaison du soleil durant l'année	10
Figure I.7:L'angle horaire	11
Figure I.8:les coordonnées horizontales.....	12
Figure I.9:La hauteur e l'Azimut du soleil.....	13
Figure I.10 :Mesure le rayonnement sur une surface d'inclinaison quelconque.....	15
Figure I.11 :Représentation des vecteurs unitaires.....	17
Figure I.12 :La divergence de l'énergie du soleil vers la terre	19
Figure I.13 :Les composants du rayonnement solaire.....	19
Figure I.14 :Pyrhéliomètre.....	22
Figure.15:Pyranomètre.....	22
Figure I.1:Héliographe de Campbell Stokes.....	22
Figure I.17: Héliographe à fibres optique.....	22
Figure I.18 : Carte de l'irradiation solaire globale inclinaison optimale	23
Figure II -1: Structure simplifiée d'une cellule solaire silicium	27
Figure II -2 : Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	28
Figure II -3 : Chaîne de fabrication des modules photovoltaïques.....	30
Figure II -4 : les deux types de cellules cristallines en silicium.....	31
Figure II -5 : cellule photovoltaïque amorphe.....	32
Figure II -6 : Cellule Tellurure de cadmium (CdTe).....	33
Figure II -7 : cellule photovoltaïque de type cuivre - indium - sélénium (CIS).....	34
Figure II -8 : des cellules hybride organique-inorganique.....	35
Figure II -9 : cellule photovoltaïque multi jonction	36
Figure II -10 : cellule de Arséniure de gallium (GaAs).....	36
Figure II -11 : diagramme montrant les différentes technologies et l'évolution des rendements des cellules au niveau de laboratoire.	38
Figure II -12 : Schéma électrique de la cellule solaire. (a) :idéal , (b): réel	39
Figure II -13 : Caractéristique courant-tension et la puissance délivrée par module photovoltaïque.....	42

Figure II -14 : Influence de l'ensoleillement sur les courbes I(V) et P(V)	44
Figure II.15: Quelques courbes I –V expérimentales et simulées	45
Figure II -16 : sonde PT100 sur le site PV du 2iE.....	46
Figure II -17 : Influence de la température sur les cellules photovoltaïque.....	47
Figure II -18 : Effet de la température sur I -V	47
Figure .II -19 : Effet de la température sur P -V	48
Figure .II -20 Variation du rendement avec la température.....	48
Figures III.1 : Rayonnement solaire globale du PV solaire à angle d'inclinaison ($\beta=0$).....	54
Figure III.2 : Rayonnement globale (numérique) pour différents angles d'inclinaison.....	55
Figure III.3: Schéma électrique d'une cellule solaire réel.....	56
Figure III.4 Variation de courant I en fonction de V pour différents valeurs de rayonnement solaire G.....	59
Figure III.5 Effet de la température ambiante sur I-V.....	60
Figure III.6 Effet de la température ambiante sur la puissance en fonction de tension V: (P-V).....	60
Figure III.7 Variation du rendement en fonction de température	61

Liste des tableaux

Tableau I.1 Caractéristiques principales du soleil	4
Tableau I.2 Longueurs d'ondes approximatives des différentes couleurs dans le vide	6
Tableau I.3 Valeur des coefficients de trouble atmosphérique.....	20
Tableau I.4 Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude.....	20
Tableau I.5 L'albédo du sol.....	21
Tableau I.6. Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.....	24
Tableau II.1 caractéristiques électrique d un panneau solaire photovoltaïque.....	50
Tableau II.2. Caractéristiques du module BP585F.....	51
Tableau III.1. Caractéristiques du module <i>BP 585 F</i>	58

Nomenclature

PARAMETRES DE GISMENT SOLAIRE

Symbole	Unité	Définition
E	ev	Quantité d'Energie
h	J.s	Constant du Planck
ν	HZ	Fréquence
C	m/s	vitesse de la lumière
Λ	m	Longueur d'onde
Φ	Degré	Latitude de lieu
Λ	Degré	Longitude du lieu
W	Degré	Angle horaire du soleil
Δ	Degré	Déclinaison du soleil
A	Degré	Azimut du soleil
H	Degré	Hauteur du soleil
B	Degré	Angle d'inclinaison
Le temps solaire vrai	heure	TSV
TSM	heure	Le temps solaire moyen
TU	heure	Le temps universel
TL	heure	Temps légal ()
I	w/m ²	Constante Solaire
AM		Masse d'air

Parameters du module photovoltaïque

Symbole	Unité	Définition
I	A	Le courant de cellule.
I_{cc}		Le courant de court-circuit.
I_0		Le courant de saturation.
I_D		Le courant de seuil de diode
I_R		Le courant d'entre résistance.
I_{ph}		Densité de courant photo généré.
I_{obs}		Densité de courant d'obscurité
I_m		le courant correspondant à la puissance maximale fournie.
V	V	La tension de cellule.
V_{OC}		La tension de circuit ouvert.
V_m		la tension correspondante à la puissance maximale fournie,
R_s	Ω	La résistance série de la cellule.
R_p		La résistance shunt.
T	$^{\circ}\text{K}$	La température de la cellule.
Q	C	La charge d'électron $e = 1.6 * 10^{-19}$ C.
N		Le facteur de qualité de diode.
K	J.K^{-1}	La constante de Boltzmann ($1.3854 * 10^{-23} \text{J.K}^{-1}$).
P_{in}	W	la puissance lumineuse incidente.
P_m		La puissance optimale de la cellule.
FF		Facteur de forme
H	%	Le rendement
STC		Standard Test Conditions
NOCT		Nominal Operating Cell Temperature

INTRODUCTION GENERALE

Les problèmes climatiques et la nécessité de réduire les émissions des gaz à effet de serre poussent les chercheurs à trouver des autres moyens propre comme l'énergie solaire .

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. 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. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré ($kWc/m^2 = 10^3 kW/m^2$) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge.

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.

L'Algérie fait partie des pays qui reçoivent une grande quantité de cette énergie, Mais le contraire il existe de nombreuses régions où la température augmente, en particulier celles du désert, ce qui affecte négativement l'efficacité des panneaux solaires et peut les amener à se décomposer ou à se gâter, il est donc nécessaire de prendre en compte le climat de la région avant de se lancer dans l'exploitation de l'énergie solaire photovoltaïque.

Les énergies renouvelables se placent au cœur des politiques énergétique et économique menées par l'Algérie ; leur développement est placé en tant que priorité nationale. Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie solaire PV est considérée comme une solution prometteuse pour la production d'électricité.

Dans le cadre ce travail, nous allons étudier numériquement l'effet de la température sur un module PV solaire dans la région de M'sila lors des journées ensoleillées. Pour se faire nous sommes contraints de développer les points suivants:

- Dans le premier chapitre, nous abordons des notions fondamentaux sur le gisement solaire à savoir les coordonnées terrestres et horaires, les temps solaires , le mouvement de la terre autour du soleil et les différents types de rayonnements.
- Nous présentons dans le deuxième chapitre une généralité sur les systèmes photovoltaïques , les différentes technologies photovoltaïques qui existent au niveau internationale et l'influence des paramètres sur la caractéristique courant tension

- Dans le troisième chapitre, nous exposons les résultats obtenues par une étude numérique à l'aide d'un code créé par le langage Fortran . Nous présentons quelques résultats concernant le rayonnement solaire au niveau de site de M'sila ainsi, nous décrivons quelques modèles mathématiques permettant de calculer le courant et la puissance délivrée par le module solaire photovoltaïque.

Nous avons ensuite présenté quelques résultats concernant l'effet de quelques paramètres comme l'éclairement solaire et l'effet de température sur les caractéristiques courant- tension et puissance ainsi que l'efficacité d'un module solaire photovoltaïque. On terminera notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I:
LE GISEMENT SOLAIRE

I-1 Introduction

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu donné et au cours d'une période donnée. Son évaluation peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale.

Elle est utilisée pour simuler le fonctionnement probable d'un système énergétique solaire et donc d'effectuer son dimensionnement le plus exact possible compte tenu des demandes en énergie à satisfaire [1].

Une source énergétique renouvelable comme l'énergie solaire représente une énergie propre, gratuite et prometteuse.

L'étude du gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire. L'énergie globale incidente sur un plan incliné est la plus appropriée que le plan horizontal, qui ne dépend que de la latitude du lieu, l'ordre ou le numéro du jour de l'année et de l'angle d'inclinaison.

Comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire à l'étude du système photovoltaïque.

Dans ce chapitre on rappellera quelques notions essentielles sur le gisement solaire.

I-2 Description du soleil

Le soleil est à l'origine de toute source d'énergie sur terre. Ceci étant vrai autant pour les énergies non renouvelables d'origine fossile, comme les hydrocarbures qui sont le résultat de la photosynthèse ; que pour les énergies renouvelables, comme l'énergie solaire, l'énergie géothermique, la biomasse...etc. [2],[3]

Comparable à une immense boule de gaz très chaud, le soleil est une étoile naine de forme pseudo-sphérique qui se compose principalement de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments chimiques, Bien que le soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul 99,9% de la masse du système solaire qui est dominé par les effets gravitationnels de l'importante masse du soleil.

Les principales caractéristiques du soleil sont illustrées dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.1 : Caractéristiques principales du soleil [1]

Caractéristique	Valeur
Masse	1, 989.1030 kg
Masse volumique moyenne	1410 kg/m ³
Diamètre	13,92.105 km
Distance du centre de la voie lactée	2,5.1047 km
Vitesse	217 km/s
Température superficielle	5770 k
Puissance rayonnée	3,83.1023 kw

On distingue trois régions particulières [1], [4], [5] :

1 - L'intérieur du soleil : cette région est divisée en trois zones ; le noyau, la zone radiative et la zone convective. Elle représente 40% de la masse du soleil et elle s'étend sur une épaisseur de 25.104 km. Sa température atteint plusieurs millions de degrés et la pression un milliard d'atmosphère .

2 - La photosphère : C'est une couche opaque d'environ 300 km d'épaisseur. Sa température est de l'ordre de quelques millions de degrés, décroissante très rapidement dans l'épaisseur de la couche jusqu'à une température dite de surface de l'ordre de 4500°C .

3 - La chromosphère et la couronne solaire : C'est une région à faible densité où la matière est très diluée, elle représente l'atmosphère du soleil. Cette couche est caractérisée par un rayonnement émis très faible est très élevée (environ un million de degrés).

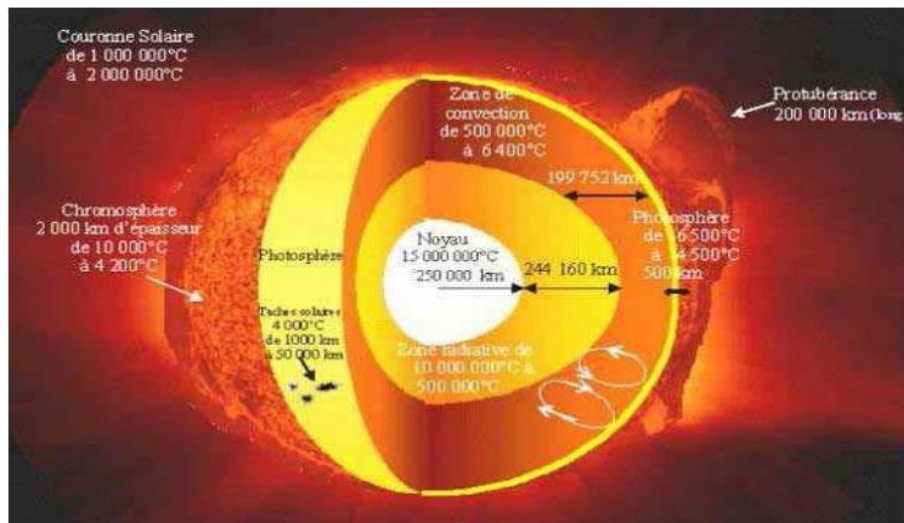


Figure I.1: Structure du soleil

I-3 Spectre solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique, sa décomposition en longueurs d'ondes est appelée spectre électromagnétique. Elle est en effet composée de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. La fréquence de la lumière détermine sa couleur. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur fréquence (longueur d'onde) par la relation :

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

h : Constant du Planck ($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s).

ν : Fréquence.

C : vitesse de la lumière ($C = 3.108$ m/s).

λ : Longueur d'onde (m).

C'est cette relation mise à jour par Louis de Broglie en 1924 qui a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière présence de corpuscules «les photons» et propagation d'ondes avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde. La figure (I.2) montre la partie visible du spectre électromagnétique. La gamme des longueurs d'onde visibles est comprise entre 390 nm (violet) à 780 nm (rouge).

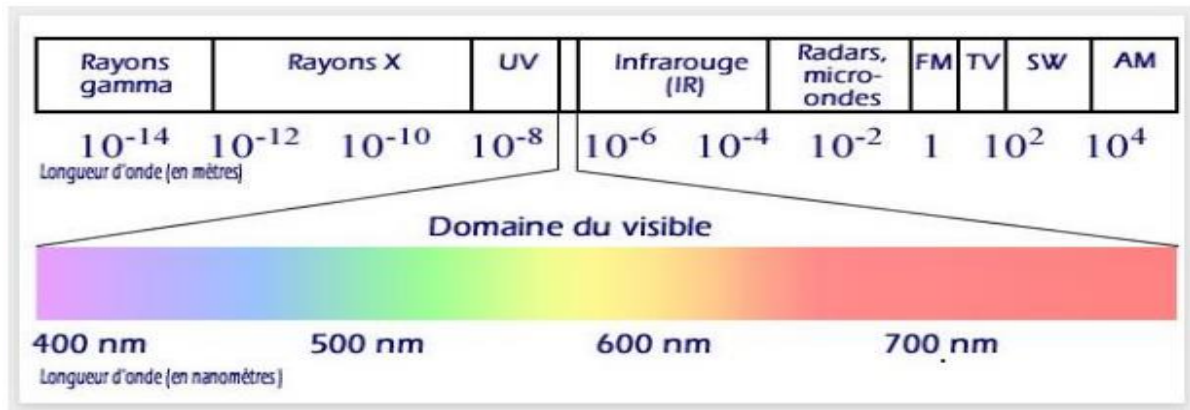


Figure I.2: Spectre électromagnétique.

Le tableau (I.2) montre la gamme de longueur d'onde approximative des couleurs visibles [6].

Tableau I.2: Longueurs d'ondes approximatives des différentes couleurs dans le vide.

Le spectre de lumière visible	
Couleur	Longueur d'ondes (nm)
Rouge	622-780
Orange	597-622
Jaune	577-597
Vert	492-577
Bleu	455-492
Violet	390-455

Le soleil émet de la lumière de l'ultraviolet aux infrarouges en passant par le visible du spectre électromagnétique. L'irradiation solaire a la plus grande ampleur aux longueurs d'onde visibles et un pic dans le bleu-vert [6].

I-4 Mouvement de la terre

Dans son mouvement autour du soleil, la terre décrit une ellipse dont le soleil est l'un de ses foyers, la révolution complète s'effectue en une période de 365,25 jours. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique.

C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil : 147 million de km. Au 22 juin la distance terre-soleil vaut 152 millions de km, c'est le jour ou la terre est la plus éloignée, est solstice d'été .Le 21 mars et le 21 septembre sont appelé respectivement équinoxes de printemps équinoxe d'automne. Aux équinoxes le jour et la nuit sont égaux.

En plus de sa rotation autour du soleil, la terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cette rotation s'effectue en une journée .

Le plan perpendiculaire de l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur.

L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, ils font entre eux un angle appelé inclinaison égale à $23^{\circ}27'$. [7]

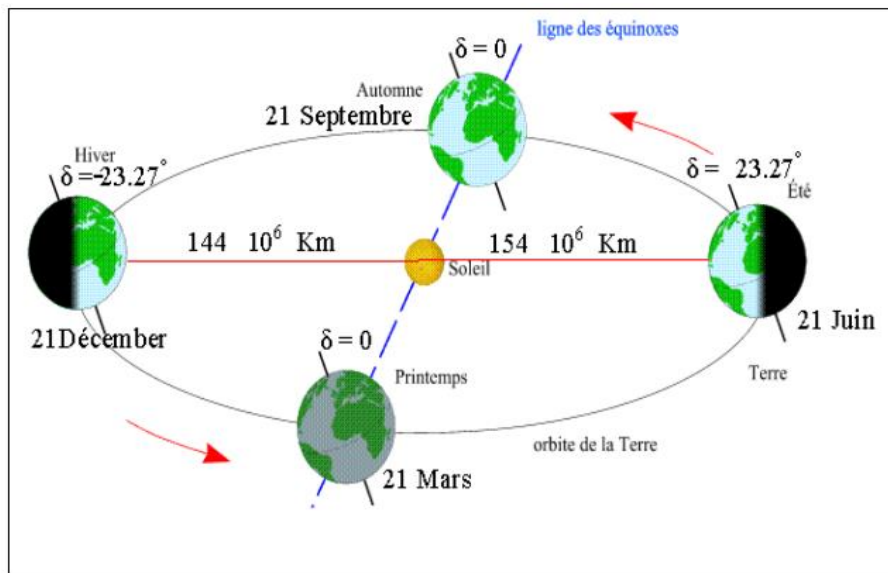


Figure (I.3): Mouvement de la terre autour du soleil

I-5 Sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire dans l'espace d'un diamètre immense, avec la terre au centre [8].

On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes caractéristiques sur la sphère elle-même comme c'est indiqué sur la figure I.4.

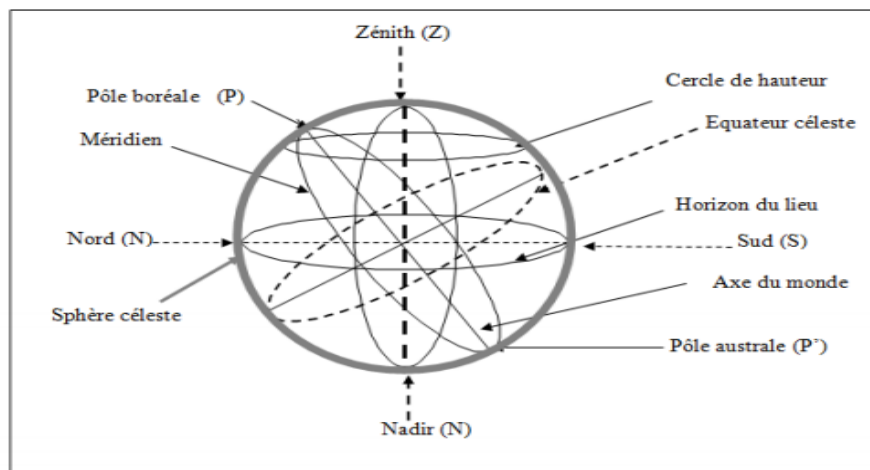


Figure I.4: Sphère Céleste

I-6 Les coordonnées géographiques terrestres

Les coordonnées géométriques utilisées pour déterminer la localisation d'un point sur la surface terrestre sont la latitude et la longitude. Elles sont calculées sous forme d'angles qui s'expriment en degrés, minutes et secondes.

I-6.1 La latitude

Elle donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur ; est une mesure angulaire ; elle varie entre la valeur 0° à l'équateur et 90° aux pôles.

$$\varphi: \text{Varie de } -90^\circ \text{ à } 90^\circ \text{ tel que : } \begin{cases} \varphi > 0 \text{ Vers le Nord} \\ \varphi < 0 \text{ Vers le Sud} \end{cases}$$

I-6.2 Longitude

Permet de localiser un point à l'Est ou à l'Ouest d'une ligne Nord-Sud de référence appelée le méridien (Greenwich). [9]

λ : Varie de -180° + 180° telque :

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda > 0 \text{ a l'est du méridien de Greenwich.} \\ \lambda < 0 \text{ a l'ouest du méridien de Greenwich.} \end{array} \right.$$

I-6.3 L'altitude

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale en mètre entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer). [10]

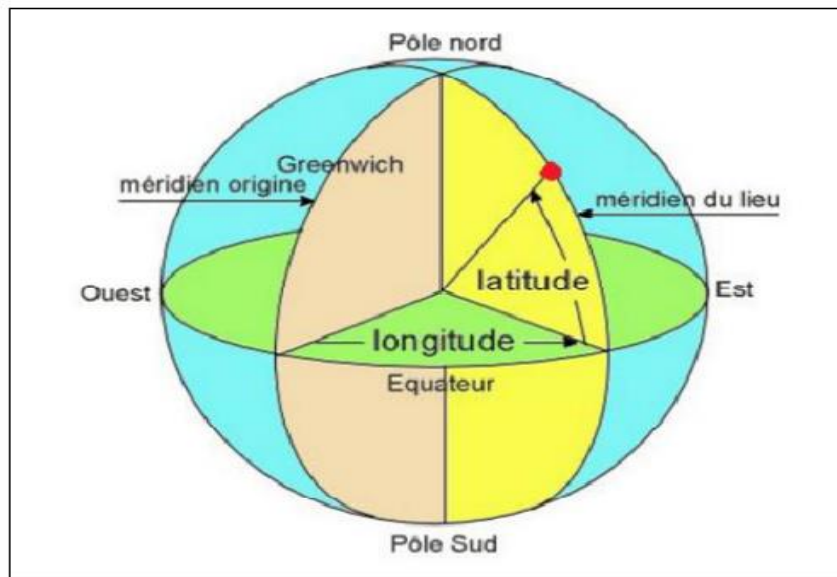


Figure I.5: Les coordonnées terrestres d'un lieu donné.

I-7 Les coordonnées du soleil par rapport à un observateur

Pour déterminer les coordonnées du soleil par rapport à un observateur situé sur la surface de la terre on définit deux repères, le repère équatorial et le repère horizontal.

I-7.1 Le repère équatorial

Le repère équatorial est un repère qui prend comme origine le centre de la terre et comme plan de référence le plan de l'équateur. Dans ce repère, la position du soleil dans le ciel est déterminée par deux coordonnées, la déclinaison δ et l'angle horaire ω [2].

I-7.2 Déclinaison solaire

Correspond à l'angle formé par le plan équatorial et la direction terre soleil. Elle varie suivant l'équation de Cooper, [2] :

$$\delta = 23,45. \sin((284 + j). 360/ 365) \quad (\text{I. 2})$$

Elle varie de $-23,45^\circ$ au solstice d'hiver à $+23,45^\circ$ au solstice d'été, et elle est nulle aux équinoxes.

Avec,

j : le numéro du jour de l'année (1er janvier=1)

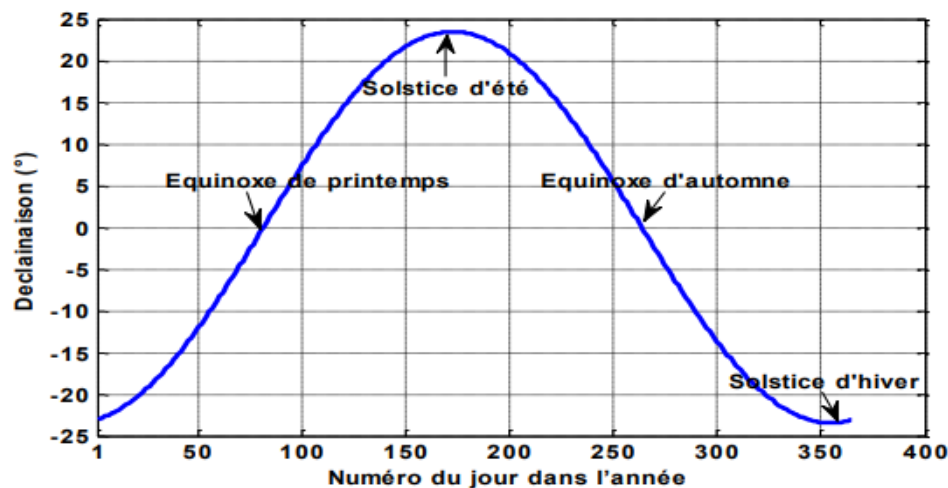


Figure I.6 La déclinaison du soleil durant l'année

I-7.3 Angle horaire du solaire(ω)

Correspond à l'angle compris entre la projection du soleil sur le plan équatorial et le méridien origine du lieu considéré passant par le sud. Il est compté Positivement dans le sens rétrograde de 0° à 360° .

Il est donné par la relation suivante:

$$\omega = 15. (TSV - 12) \tag{I. 3}$$

Ou,

Tsv , est le temps solaire vrai.

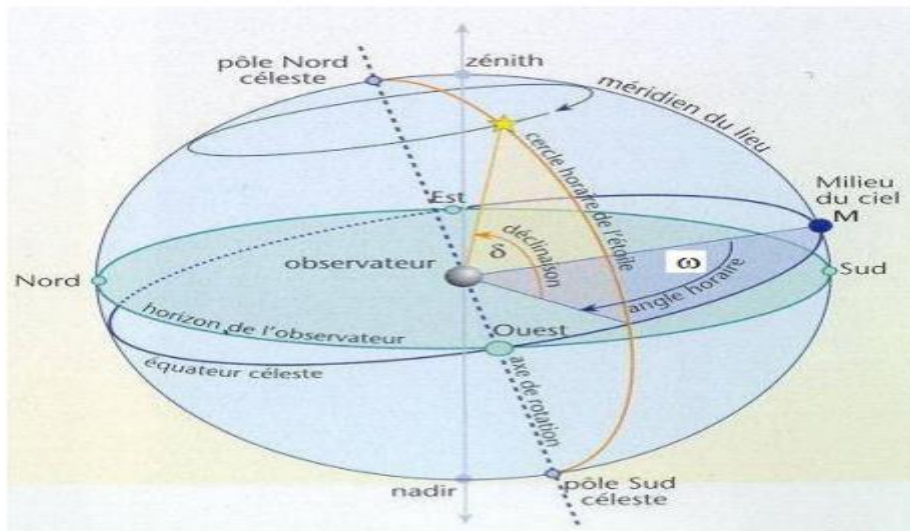


Figure I.7: L'angle horaire.

I-7.4 Les coordonnées horizontal

Le repère horizontal est un repère qui prend comme origine le lieu de situation de l'observateur et comme plan de référence le plan de l'horizon astronomique. Dans ce repère. La position d'un astre dans l'espace peut être repérée par ses coordonnées horizontales définies sur la sphère céleste figure (1-8) à savoir :

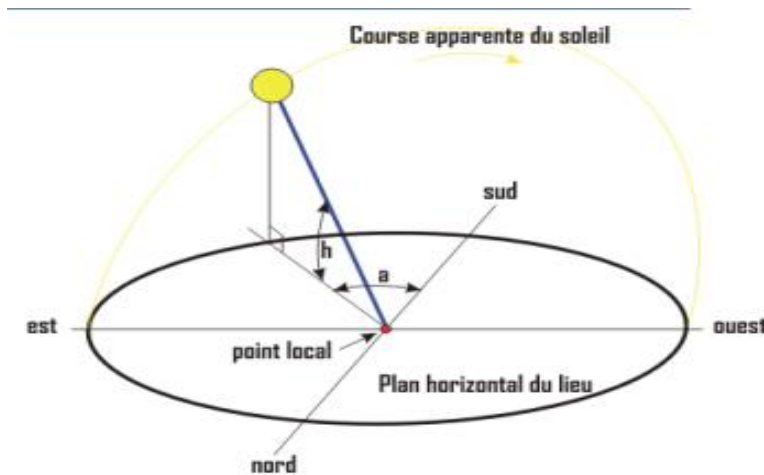


Figure I.8 : les coordonnées horizontales

I-7.5 La hauteur du soleil

Elle correspond à l'angle formé par le vecteur directionnel du soleil et sa projection sur le plan horizontal, figure (1-8), elle vaut 0° au lever et coucher du soleil et elle prend sa valeur maximale (90°) à midi solaire. Elle est évaluée par la relation suivante [2] :

$$\sin h = \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \varphi \quad (\text{I. 4})$$

La hauteur maximale du soleil correspond à $\omega = 0$, obtenu à midi en temps solaire vrai elle est évaluée par la relation suivante :

$$h_{max} = 90 - (\varphi - \delta) \quad (\text{I. 5})$$

Elle varie selon la latitude d'un lieu et la déclinaison du soleil (le jour de l'année).

I-7.6 Azimut du soleil

Il correspond à l'angle formé par la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et le méridien du lieu. Il est compté positivement vers l'est et négativement vers l'ouest. Il est donné par la relation suivante [2] :

$$\sin a = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos h} \quad (\text{I. 6})$$

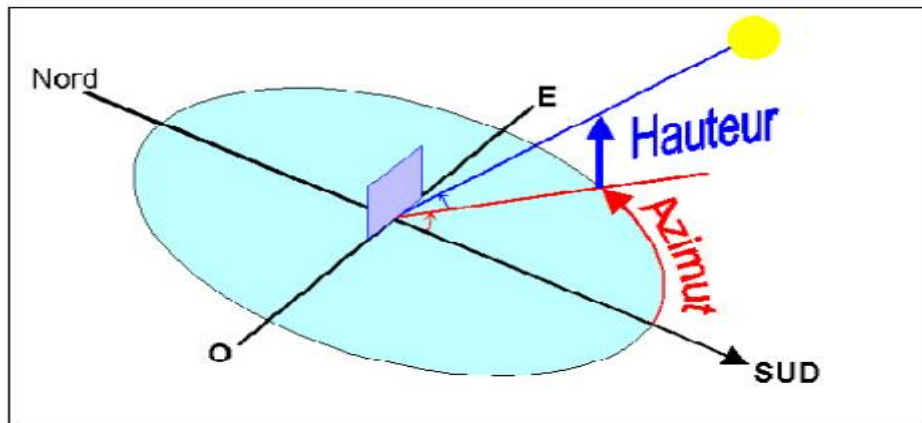


Figure I.9 La hauteur e l'Azimut du soleil

I-8 Les temps solaires

I-8.1 Le temps solaire vrai (TSV)

Le soleil tourne dans le plan de l'équateur de 360° en 24 heures, soit 15° par heure, il existe ainsi une relation simple reliant le temps solaire vrai TSV et l'angle horaire ω [11].

$$\omega = 15. (TSV - 12) \quad (I. 7)$$

I-8.2 Le temps solaire moyen (TSM)

La trajectoire de la terre autour du soleil est elliptique (première loi de Képler). Durant ce mouvement, le rayon vecteur Soleil-Terre balaie des aires égales dans des temps égaux (deuxième loi de Képler). Tout ceci, ajouté au fait que l'axe de rotation de la terre est incliné par rapport au plan de l'écliptique, fait que la durée du jour solaire vrai varie selon les époques de l'année [2].

On introduit alors la notion de temps solaire moyen (TSM) qui varie de ± 16 mn par rapport au temps solaire vrai (TSV) ce qui correspond à l'équation de temps.

TSM est donnée par la relation suivante [11] :

$$TSM = TSV - ET \quad (I. 8)$$

Ou :

Et est le terme correctif appelé équation de temps Cette quantité peut être calculée par la formule suivante [11] :

$$Et = -0,0002 + 0,4197 \times \cos(0,984j) - 7,3509 \times \sin(0,984j) - 3,2265 \times \cos(2 \times 0,984j) - 9,3912 \times \sin(2 \times 0,984j) - 0,0903 \times \cos(3 \times 0,984j) - 0,3361 \times \sin(3 \times 0,984j) \quad (\text{I. 9})$$

I-8.3 Le temps universel (TU)

Le temps universel est égal au temps solaire moyen du méridien origine (méridien de Greenwich).

Il est exprimé ainsi [2]:

$$TU = TSM + \frac{L}{15} \quad (\text{I. 10})$$

Avec

L : la longitude exprimée en degré et les temps en heure.

I-8.4 Temps légal (TL)

L’heure légale correspond à l’heure que nous lisons aux horloges, elle est donnée par la relation suivante [2] :

$$TL = TU + C1 + C2 \quad (\text{I.11})$$

Ou,

C1 est le décalage horaire par rapport au Greenwich

C2 correspond à l’heure d’été et d’hiver, s’il y a lieu.

I-8.5 Lever et coucher du soleil

L’angle horaire au lever et au coucher du soleil correspond à $h = 0$, en remplaçant dans la formule (I.3), on trouve :

$$\omega l = \text{arc}(-\tan \delta \cdot \tan \varphi) \quad (\text{I.12})$$

Selon la relation (1.7) l’heure solaire au lever du Soleil a donc pour expression :

$$(TSV)l = 12 - \frac{\omega l}{15} \quad (\text{I.13})$$

L’angle horaire ωc au coucher du soleil est l’opposé de l’angle horaire au lever du soleil, on a donc $\omega c = -\omega l$, l’heure solaire au coucher du Soleil a donc pour valeur :

$$(TSV)c = 12 - \frac{\omega c}{15} = 12 + \frac{\omega l}{15} \tag{I.14}$$

I-8.6 La durée du jour

La durée du jour est donnée par la relation suivante [11]:

$$d = (TSV)c - (TSV)l = 2 \times \frac{\omega l}{15} \tag{I.15}$$

I- 9 Angle d'incidence sur un plan

L'angle d'incidence i est l'angle entre la direction du soleil et la normale du plan. Cet angle est déterminé par la connaissance des cosinus directeurs du rayon incident et la normale en coordonnées horizontales, (figure. I.10).

$$\cos(i) = \cos(\beta - a) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(h) + \sin(\gamma) \cdot \sin(h) \tag{I.16}$$

γ : Orientation de plan

a : l'azimut solaire

β : angle d'inclinaison par rapport à l'horizontal

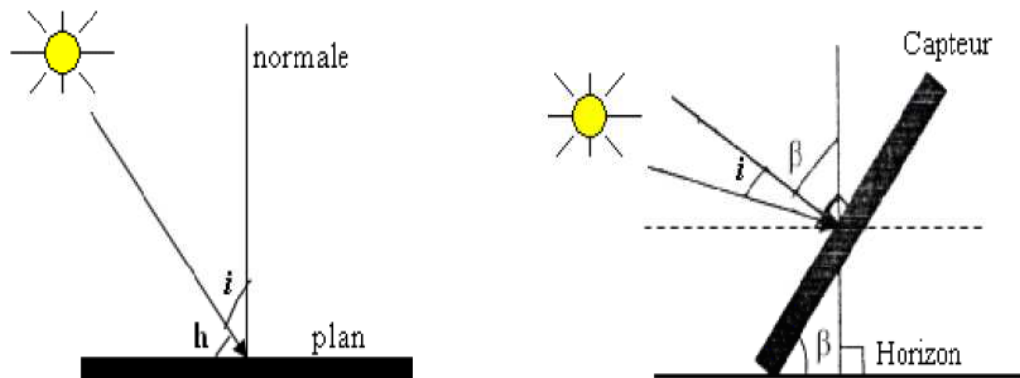


Figure (I.10): Mesure le rayonnement sur une surface d'inclinaison quelconque

I-10 Direction des rayons solaires par rapport à un plan

On considère un plan quelconque situé dans un lieu de latitude caractérisé par deux angles : γ : L'angle entre le méridien local et la normale au plan (figure I.9).

$\gamma = 0$; le plan est orienté vers le Sud.

$\gamma = \pi$; le plan est orienté vers le Nord.

$\gamma = -\pi/2$; le plan est orienté vers l'Est.

$\gamma = \pi/2$; le plan est orienté vers l'Ouest.

β = l'angle entre le plan horizontal et le plan considéré.

$\beta = 0$; le plan est horizontal.

$\beta = \pi/2$; le plan est vertical.

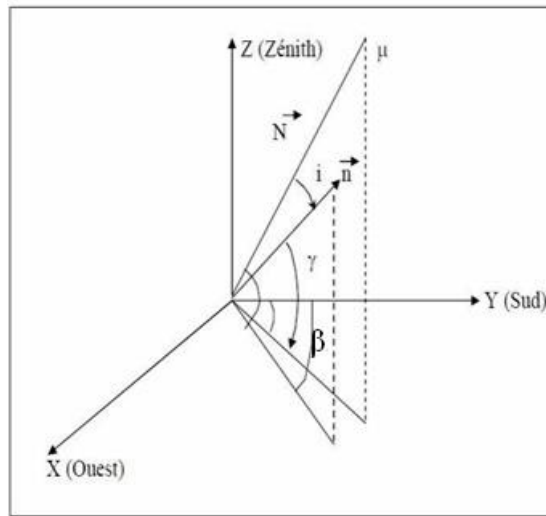
Soit :

N : le vecteur unitaire porté par la direction des rayons solaires.

n : le vecteur unitaire porté par la normale à la surface.

i : l'angle d'incidence (n, N) . (figure I.11)

$$\vec{N} \left\{ \begin{array}{l} \sin(\beta) \times \cos(h) \\ \cos(\beta) \times \cos(h) \\ \sin(h) \end{array} \right. \quad \vec{n} \left\{ \begin{array}{l} \sin(\beta) \times \cos(\gamma) \\ \cos(\beta) \cos(\gamma) \\ \sin(\gamma) \end{array} \right. \left. \right\}$$



Figure(I.11): Représentation des vecteurs unitaires

$$\vec{N} = \left\| \vec{n} \right\| \times \left\| \vec{N} \right\| \times \cos(i) = \cos(i).$$

$$\vec{N} \times \vec{n} = \sin(a) \times \cos(h) \times \sin(\beta) \times \cos(\gamma) + \cos(a) \times \cos(h) \times \cos(\beta) \cos(\gamma) + \sin(h) \times \sin(\gamma) = \cos(i).$$

Par conséquent

$$\cos(i) = \cos(h) \times \cos(\gamma) \times \cos(a - \beta) + \sin(h) \times \sin(\gamma)$$

Exprimons COS (i) en coordonnées horaires, il en résulte:

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \sin(\omega) \times \sin(\beta) \times \cos(\gamma) + [\sin(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) - \cos(\Phi) \times \sin(\delta)] \times \cos(\beta) \times \cos(\gamma) + [\cos(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) + \sin(\Phi) \sin(\delta)] \times \sin(\gamma)$$

(I.17)

Quelques cas particuliers:

Dans les cas particuliers où les surfaces sont horizontales ou verticales avec une orientation vers le sud ($\gamma = 0$), l'expression (I.17) devient:

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \sin(\omega) \times \sin(\beta) + [\sin(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) - \cos(\Phi) \times \sin(\delta)] \times \cos(\beta)$$

Surface vertical $\beta = \pi/2$

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \sin(\omega)$$

Surface horizontal ($\beta = 0$) :

$$\cos(i) = [\sin(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) - \cos(\Phi) \times \sin(\delta)]$$

I-11 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est une énergie produite par le Soleil à la suite des réactions de fusion thermonucléaire qui dégage une très grande quantité d'énergie, source de la plupart des énergies disponibles sur Terre et exploitable pour la production d'électricité et dans l'utilisation thermique.

L'énergie solaire se propage dans l'espace sous la forme de « grains », ou quanta d'énergie, les photons ; elle est sans cesse renouvelée.

L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude et de l'orientation de la surface considérée.

I-12 Constante Solaire

Le flux du rayonnement à la surface du soleil est d'environ 6,33.10⁷ W/m² .

Une surface plane, d'un mètre carré perpendiculaire au rayonnement solaire, située à la limite de l'atmosphère terrestre reçoit une puissance rayonnée en fonction de la distance Soleil-Terre (149 597 870.103 m ou 1UA représente la distance moyenne Soleil-Terre). Cette distance a une faible variation au cours de l'année, compte tenu de la légère excentricité de l'orbite terrestre qui est d'environ 1,7% [12].

La constante solaire est une valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, sa valeur est estimée à 1367 W/m² (Fröhlich et Brusa, 1981, et Iqbal, 1983) [13].

La représentation schématique du système Soleil-Terre est indiquée dans la figure I.2 [14].

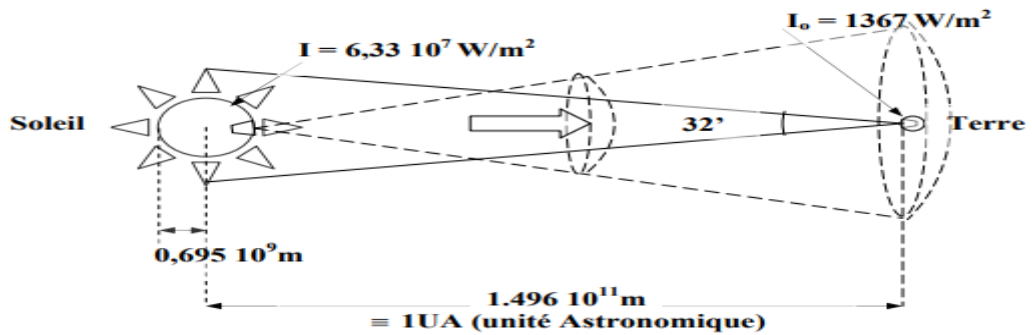


Figure I.12 La divergence de l'énergie du soleil vers la terre [14]

La variation de la constante solaire en fonction du numéro du jour (n_j) de l'année suit la relation suivante :

$$I_c = I_0 [1 + 0,033 \cos(0,984 \times n_j)] \quad (I.18)$$

n_j : numéro du jour de l'année.

I-13 Différents types de rayonnement solaire

Le rayonnement global sur une surface avec orientation arbitraire et une inclinaison par rapport à l'horizontale est la somme de rayonnement direct, le rayonnement diffus du ciel et le rayonnement réfléchi, figure (I.13).

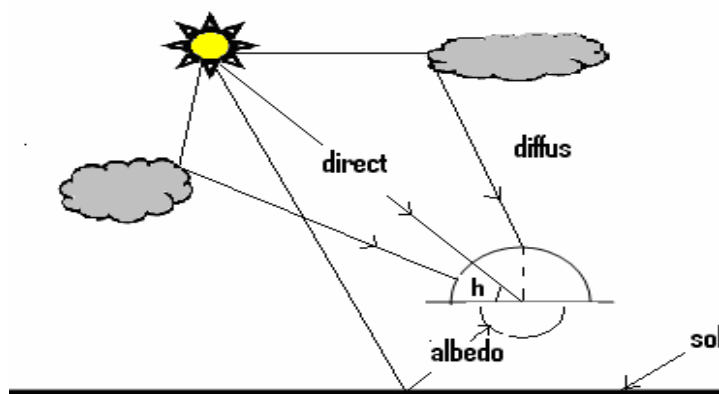


Figure (I.13) : Les composants du rayonnement solaire

a) Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est constitué par la lumière diffusée par l’atmosphère et de sa réfraction par le sol. La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel ce sont à la fois les molécules d’air, les gouttelettes d’eau (nuage) et les poussières qui produisent cet éclatement des rayons du soleil.

Le flux diffus émis par la voûte céleste I_{diff1} donné par la relation :

$$I_{diff1} = I_h \times \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \tag{I.19}$$

avec

$$I_h = I_c \times \sin(h) \times (0.271 - 0.2939 \times \tau_{dir})$$

τ_{dir} : Étant la transmissivité total de la couche atmosphérique pour le flux solaire incident direct est donnée par:

$$\tau_{dir} = a \times \exp\left(\frac{-b}{\sin(h)} \times \frac{p}{1000}\right)$$

a et b : Coefficients traduisant les troubles atmosphérique , Tableau (I.3)

P: la pression atmosphérique en fonction de l'altitude, Tableau (I.4)

	Ciel Pur	Conduction normale	Zone industrielles
a	0.87	0.88	0.91
b	0.17	0.26	0.43

Tableau (I.3): Valeur des coefficients de trouble atmosphérique

Altitude(m)	0	500	1000	1500	2000	5000
P(mbar)	1000	950	900	850	800	500

Tableau (I.4): Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude

Le rayonnement émis par le sol I_{diff2} est dépend de l'albédo du sol qui représente le rapport entre la partie réfléchié par le sol et la partie reçue donné par l'expression :

$$I_{diff2} = \rho \times \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \times (I_c \times \tau_{dir} \times \sin(h) + I_h) \tag{I.20}$$

ρ : L'albédo du sol, il dépend de l'environnement du site, Tableau (I.5)

Nature du sol	ρ
Herbe fraîche	0,20
Herbe sèche	0,30
Terre cultivée, nue	0,16
Gravier	0,22
Neige fraîche	0,85
Etendu d'eau	0,05

Tableau (I.5):L'albédo du sol

b) Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement reçu directement du soleil, sans diffusion dans l'atmosphère, ses rayons sont parallèles entre eux.

Le rayonnement direct reçu dans le plan du capteur est donné par :

$$I_{(\alpha, \gamma)} = I_{dir} \cdot \cos(i) \tag{I.21}$$

Avec :

$$I_{dir} = I_c \times a \times \cos(i) \times \text{Exp}\left(\frac{-b}{\sin(h)} \times \frac{p}{1000}\right)$$

I_{dir} : rayonnement direct normal

i : Angle d'incidence

c) Rayonnement global

Le rayonnement global sur une surface est la somme du rayonnement direct (I_{dir}) et du rayonnement diffus (I_{dif}), soit :

$$I_{gl} = I_{dir} + I_{dif} \tag{I.22}$$

I-14 instrumentation de Mesure du rayonnement



Figure I.14 : Pyrhélioimètre



Figure I.15: Pyranomètre.



Figure (I.16):Héliographe de Campbell Stokes



Figure (I.17): Héliographe à fibres optique

I-15 Le gisement solaire en Algérie

L'Algérie offre des possibilités considérables pour le développement des applications solaires et éoliennes via l'exploitation de l'énergie solaire et éolienne sous ses différentes formes selon les diverses modes de captations existants avec la disparition des ressources fossiles vers les années 2050 [15].

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [16].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde, comme illustré sur la carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel (figure I.18).

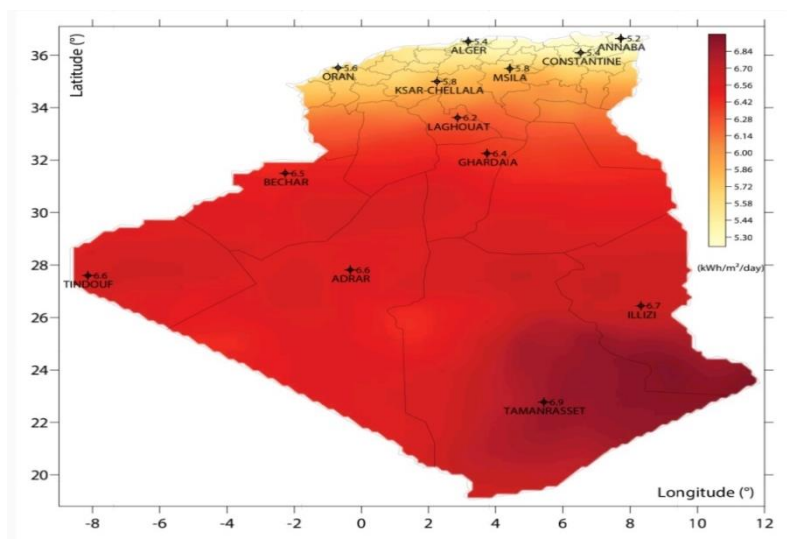


Figure I.18 : Carte de l'irradiation solaire globale inclinaison optimale .

L'Algérie possède un gisement solaire parmi les plus élevés dans le monde, la durée moyenne d'ensoleillement dans le Sahara algérien est de 3500 heures, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable dans cette région, s'il est exploité de manière économique.

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 Kwh/m² /an au Nord et 2263 KWh/m²/an au sud du pays. [17-18]

Tableau I.6. Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques [19].

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue	1700	1900	2650

L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair, mois de juillet) dépasse les 6 Kw/m² et l'énergie annuelle maximale en Algérie est de l'ordre de 2500 KWh/m², la carte suivante représente les zones énergétiques en Algérie [20].

Comme on peut le constater il existe quatre zones énergétiques en Algérie.

I-16 Conclusion

L'étude du gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire.

Dans ce chapitre, on a présenté la présentation des notions essentielles sur le gisement solaire à savoir les coordonnées terrestres, le mouvement du soleil, différentes composantes du rayonnement solaire et autres.

L'énergie globale incidente sur un plan incliné est la plus appropriée que le plan horizontal, qui ne dépend que de la latitude du lieu, l'ordre ou le numéro du jour de l'année et de l'angle d'inclinaison. L'étude du rayonnement solaire s'avère nécessaire pour le choix du meilleur site en vue d'une installation d'un système de concentration solaire.

L'objet de ce chapitre traitait De nombreux travaux de recherche ont été développés sur l'estimation de l'irradiation solaire au sol pour faire le dimensionnement d'une installation solaire et prédire le rayonnement solaire, la connaissance du potentiel solaire pour faire des installations solaires photovoltaïque ou pour la production l'électricité oblige la meilleur mesuré des différents paramètres de l'irradiation, nous présenterons dans le prochain chapitre la technologie photovoltaïque .

CHAPITRE II :
GENERALITES SUR LES SYSTEMES
PHOTOVOLTAIQUES

Dans ce chapitre, nous allons présenter des notions générales sur des différents modèles des cellules solaires et leurs méthodes de fonctionnement ...

II.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. donc, Les cellules solaires et modules photovoltaïques sont des composants de conversion d'énergie qui produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière.

L'énergie solaire photovoltaïque est à distinguer de l'énergie solaire thermique, qui est une autre technique destinée au chauffage de l'eau par conversion directe de l'énergie solaire en calories à l'aide de capteurs plans.

On parle généralement d'énergie solaire photovoltaïque, car le soleil est la source lumineuse la plus intense de notre planète, et la plupart des applications sont en plein air. Mais certains préfèrent l'expression énergie lumière, pour insister sur le fait que toute source de lumière, même artificielle(ampoules, tubes fluorescents...), peut générer de l'électricité à travers une cellule solaire.

Cet ouvrage décrit le fonctionnement de l'énergie solaire photovoltaïque et donne les bases de sa mise en œuvre pratique. Renouvelable, cette énergie respecte notre environnement en réduisant les émissions des gaz à effet de serre (elle n'en émet aucun lors de son utilisation).

II.2 Description de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est constituée par un matériau semi-conducteur de type P-N. La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu'à 100 cm² ou plus.

Cette cellule se compose d'une jonction PN, elle est obtenue en dopant les deux faces d'une tranche de silicium. Sous l'action d'un rayonnement solaire, les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction pour former un générateur électrique. Cellule solaire ou photopile sont des termes équivalents, qui désignent généralement des capteurs de petite taille, utilisés soit tels quels, soit assemblées dans un panneau solaire, ou module photovoltaïque [21].

La conversion d'énergie photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physique, intimement liés et simultanés [22]:

- L'absorption de la lumière dans le matériau.
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques.
- La collecte des charges.

Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque [23].

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.

Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnelle à la surface du module.

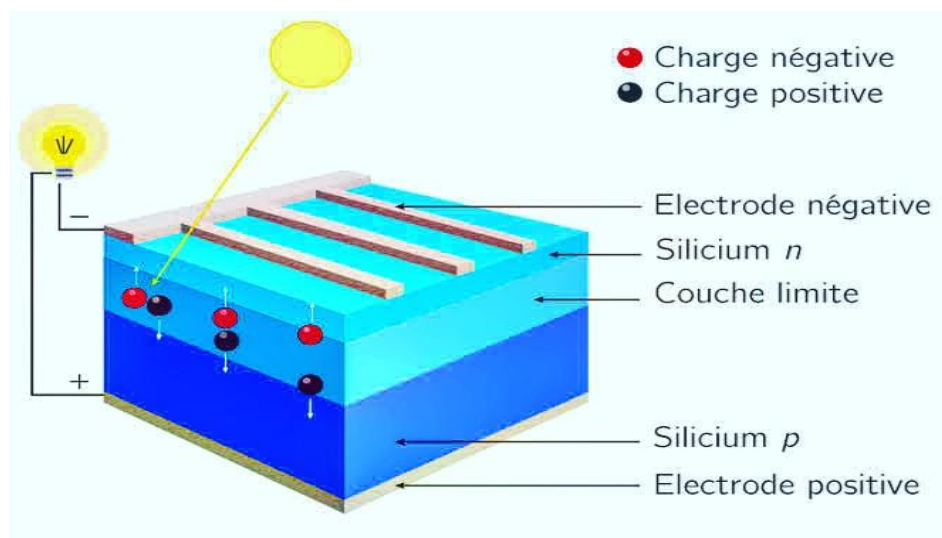


Figure II -1: Structure simplifiée d'une cellule solaire silicium .

II.3 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

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

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au Bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore), créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. [24]

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériau semi-conducteur et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possède une bande interdite, qui joue le rôle de la barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

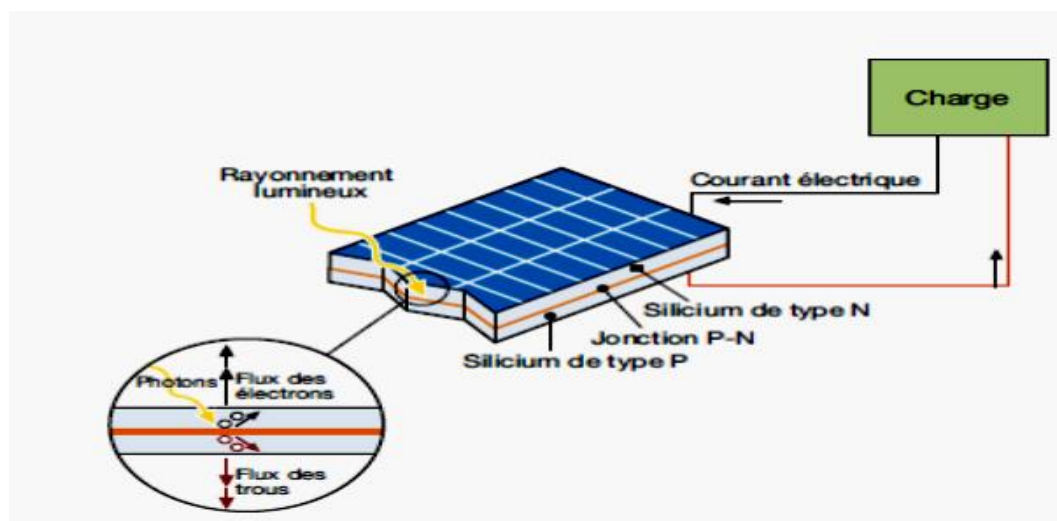


Figure II -2 : Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

En effet, le fonctionnement des cellules photovoltaïques dépend des conditions d'ensoleillement et de température à la surface de la cellule. Ainsi, chaque courbe courant tension correspond à des conditions spécifiques de fonctionnement.

A température fixés, pour les deux régimes (sous obscurité et sous éclairément)

II.4 LES DIFFERENTS TYPES DES CELLULES SOLAIRES

les cellules solaires ont évolué en plusieurs générations que l'on peut définir comme suit :

II.4.1 1^{ère} génération : cellules cristallines

Ces cellules, généralement en silicium, ne comprennent qu'une seule jonction p-n. La technique de fabrication de ces cellules, basée sur la production de "wafers" à partir d'un silicium très pure, reste très énergivore et coûteuse. La limite théorique de rendement de ce type de cellule est de $\pm 27\%$. Les cellules les plus récentes s'approchent chaque année de plus en plus de cette limite[25]

Méthode de fabrication : le cristal formé par refroidissement du silicium en fusion dans des creusets parallélépipédiques est ensuite découpé en fines tranches appelées "wafers".

Les cellules sont alors obtenues après dopage et traitement de surface.

Et On passe par plusieurs étapes :

- (1) minerai de Silicium
- (2) raffinage (pour augmenter la pureté)
- (3) Silicium en fusion donnant des lingot
- (4) après solidification
- (5) wafer obtenu par sciage du lingot
- (6) traitement de surface par procédés physico chimiques
- (7) cellule finie avec électrodes

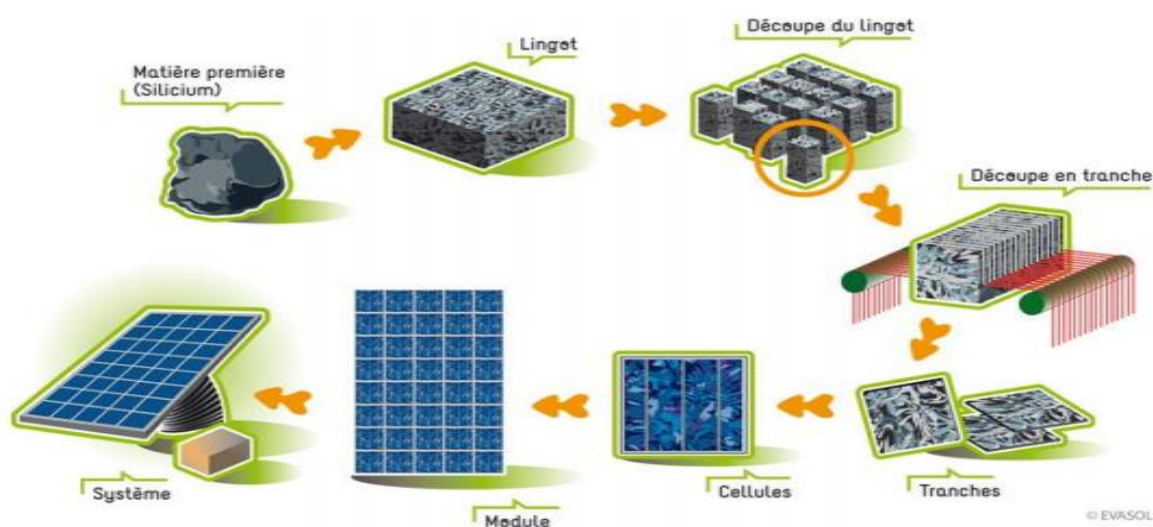


Figure II -3 : Chaîne de fabrication des modules photovoltaïques

On distingue deux types de cellules cristallines :

II.4.1.1 Silicium monocristallin

Matériau le plus répandu, présentant un bon rendement à fort et moyen éclairement, il est à la base des panneaux « terrestres » les plus performants après ceux à l'arséniure de gallium.

- Rendement électrique des panneaux : 15 à 27 % STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 300 Wc.
- Gamme d'éclairement : 100 à 1 000 W/m².
- Usage : tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance : télécoms, habitat, centrales et toits solaires.[26]

II.4.1.2 Silicium poly (ou multi-) cristallin

Cousin germain du précédent (composés de multi cristaux, voir section 3.2), il est un peu moins performant, essentiellement aux éclaircements modérés, et également moins onéreux.

- Rendement électrique des panneaux : 12 à 23 % STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 300 Wc.
- Gamme d'éclairement : 200 à 1 000 W/m².
- Usage : id. silicium cristallin. [26]



Figure II -4 : les deux types de cellules cristallines en silicium

II.4.2 2ème génération : couches minces “thin films”

Dans le cas de “couches minces”, le semi conducteur est directement déposé par vaporisation sur un matériau support (du verre par exemple).

Le silicium amorphe (a-Si) (silicium non cristallisé de couleur gris foncé), le tellure de cadmium (CdTe), le di sélénium de cuivre indium (CIS) font notamment partie de cette génération.

Ce sont des cellules de cette technologie que l’on retrouve dans les montres, calculatrices,... dites solaires ! [25]

II.4.2.1 Silicium amorphe

Nettement moins puissant au soleil que les deux précédents, ce silicium en couche très mince répond par contre à tous les éclairagements, extérieur et intérieur. Sa technologie de fabrication est théoriquement moins onéreuse (mais la production n’a pas atteint des niveaux comparables) et permet de réaliser des petits formats, grâce à la mise en série intégrée et la simplicité de découpe.

- Rendement électrique des panneaux : 5 - 14 % STC (jusqu’à 12 % pour les « multi-jonctions»).
- Puissance des photopiles intérieures : 0 à 1 Wc.
- Puissance des panneaux extérieurs : 0,5 à 90 Wc.
- Gamme d’éclairément : 20 lux (en intérieur) à 1 000 W/m² (en extérieur).

- Usage : électronique professionnelle et grand public (montres, calculettes...), électronique de faible consommation en extérieur, baies vitrées semi-transparentes, centrales au sol. [26]



Figure II -5 : cellule photovoltaïque amorphe

II.4.2.2 Tellure de cadmium (CdTe)

Intéressant surtout pour son coût de fabrication devenu très bas ces dernières années, ce matériau, qui a longtemps souffert de problèmes de stabilité et de maîtrise des procédés industriels, est aujourd'hui le leader incontesté des couches minces.

En termes de performances, il se situe au niveau des meilleures multi-jonctions silicium amorphe.

Cependant il risque de souffrir de problèmes de pénurie (le tellure est un élément rare) et il contient un élément potentiellement dangereux déjà interdit dans de nombreux pays (le cadmium1).

- Rendement énergétique des panneaux : 8 à 22 %
- Puissance des panneaux : 70 à 150 W
- Gamme d'éclairement : extérieur
- Usage : centrales solaires principalement. [26]



Figure II -6 : Cellule Tellurure de cadmium (CdTe)

II.4.2.3 CuInSe₂ (CIS) et CuInGaSe (CIGS)

Les photopiles utilisant ces matériaux sont produites en couche mince par des méthodes chimiques ou de dépôt sous vide, sur une sous-couche de CdS (sulfure de cadmium). Elles ont d'assez bonnes propriétés électroniques.

De plus, elles bénéficient des mêmes commodités de fabrication que le silicium amorphe (mise en série et découpe simples).

Mais cette technologie est assez peu commercialisée dans le monde, sans doute à cause de difficultés d'industrialisation et de tenue climatique, mais surtout en raison du cadmium qu'elle contient (elle pourrait souffrir des directives européennes sur l'exclusion des matériaux dangereux).

- Rendement des panneaux : 10 - 23 %
- Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc
- Usages : alimentations de faible et moyenne puissance en extérieur, habitat raccordé au réseau. [26]

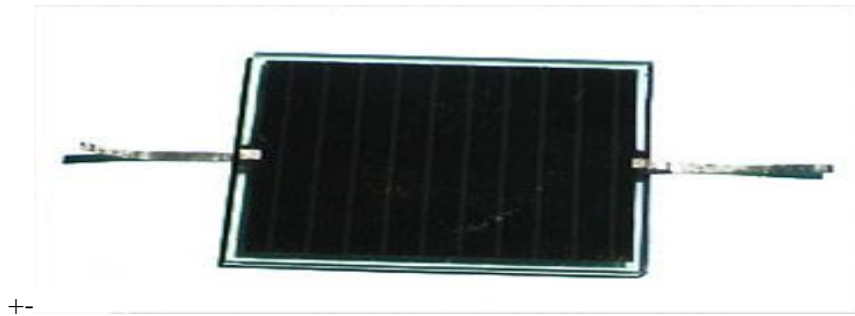


Figure II -7 :cellule photovoltaïque de type cuivre - indium - sélénium (CIS)

(Source [.Solar World](#))

II.4.3 3ème génération : Pérovskites, multi jonction, concentration, ...

Pour améliorer les rendements des cellules, la recherche se tourne actuellement vers plusieurs pistes dont notamment :

II.4.3.1 : Pérovskites

Les cellules Pérovskites sont des cellules composées d'un élément hybride organique-inorganique ayant une structure de pérovskite.

Ces cellules sont apparues en 2000 avec un rendement de 3,8 %.

Depuis, en 2016, le rendement est passé à 22,1 % ce qui en fait une alternative prometteuse ! Leur coût de production est faible.

L'inconvénient de ces cellules réside dans leur instabilité et faible résistance aux agents extérieurs (eau, températures...). Néanmoins bon nombre de recherches prometteuses sont en cours et devraient finir de rendre ce type de cellules rapidement intéressantes.

[25]

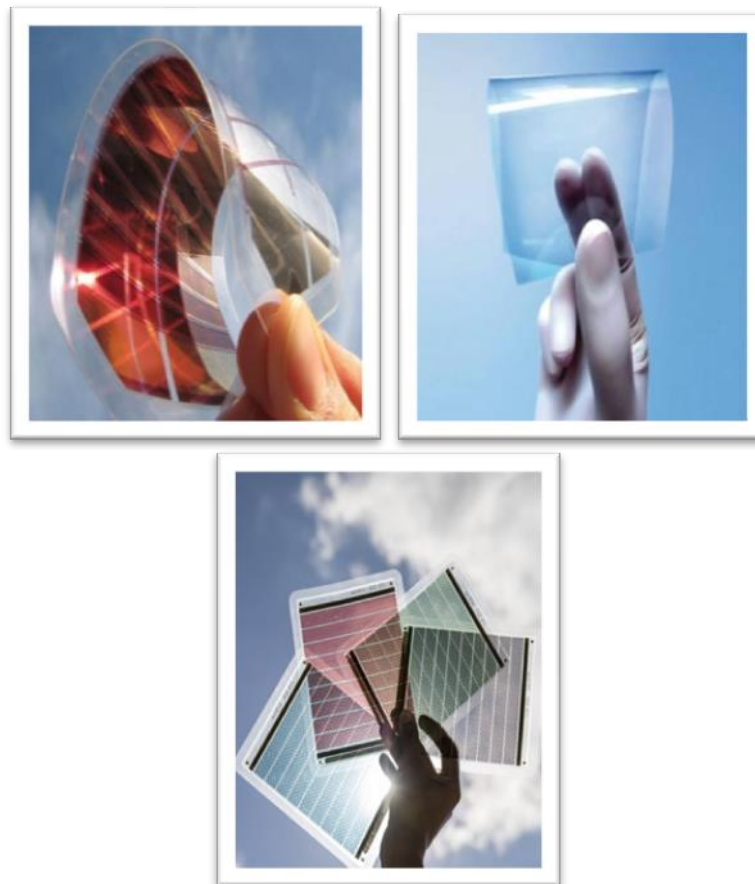


Figure II -8 : des cellules hybride organique-inorganique

II.4.3.2 Les cellules multi-jonction

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion.

Ce type de cellules est déjà commercialisé, mais principalement pour des applications spatiales. Les rendements obtenus sous concentration sont très prometteurs (au delà de 30 %)..



Figure II -9 : cellule photovoltaïque multi jonction (Source. [Spectrolab](#))

Cellules à concentration (permet d'utiliser des photons à basse énergie qui ne sont habituellement pas absorbés par la cellule).

II.4.3.3 Arséniure de gallium (GaAs)

Ce matériau à très haut rendement est un cas à part : très onéreux du fait des éléments utilisés, il n'est employé que pour des panneaux solaires de satellites ou sur des systèmes à concentration.

Dans ces applications, le rendement et le poids sont les critères de sélection et non le prix !

- Rendement électrique (STC, voir section 3.3, rubrique Puissance-crête/rendement) : 25-40 %.
- Usage : satellites, concentrateurs.
- Particularité : prix très élevé. [26]

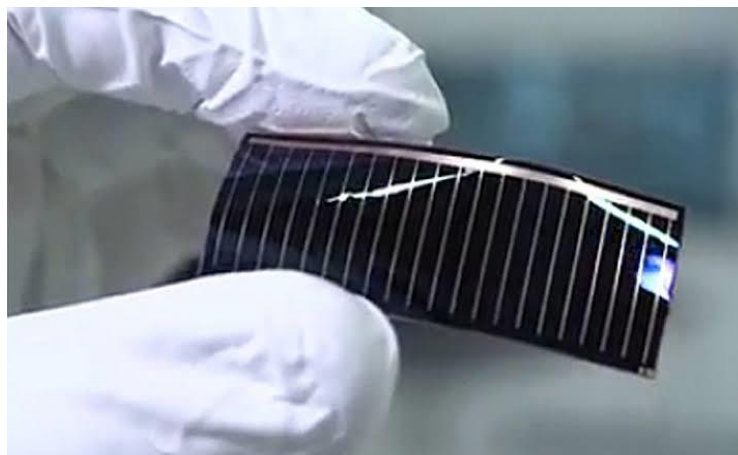


Figure II -10 : cellule de Arséniure de gallium (GaAs)

II.5 EVOLUTION DE RENDEMENTS DES DIFFRENTS TYPES DE CELLULES

L'efficacité record des cellules de laboratoire est de 26,7% pour le silicium monocristallin et de 22,3% pour le silicium multi cristallin.

technologie à base de plaquettes. L'efficacité de laboratoire la plus élevée dans la technologie des couches minces est de 23,4% pour CIGS et 21,0% pour les cellules solaires CdTe. L'efficacité record des cellules de laboratoire pour la pérovskite est de 21,6%.

Au cours des 10 dernières années, l'efficacité des modules de silicium commerciaux à base de plaquettes environ 12% à 17% (Super-mono 21%). Dans le même temps, l'efficacité du module CdTe est passée de 9% à 19%.

En laboratoire, les modules les plus performants sont à base de silicium monocristallin avec 24,4% Efficacité. Des efficacités record démontrent le potentiel de nouvelles augmentations d'efficacité niveau de production.

En laboratoire, les cellules solaires multi-jonctions à haute concentration atteignent une efficacité allant jusqu'à 47,1%

aujourd'hui. Grâce à la technologie des concentrateurs, des rendements de modules allant jusqu'à 38,9% ont été atteints. [27]

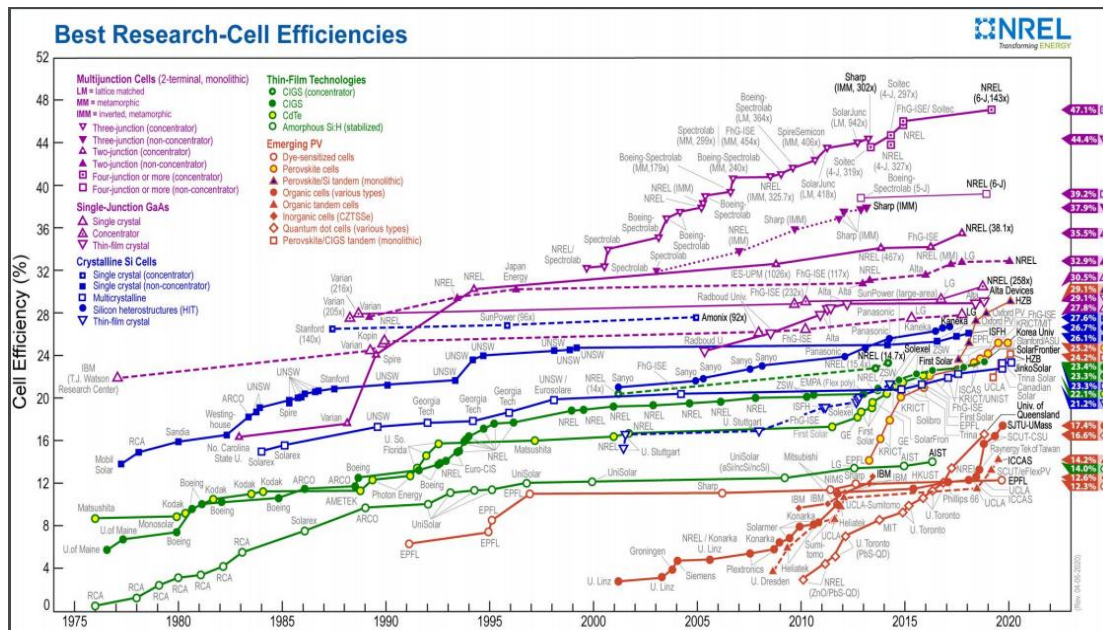


Figure II -11 : diagramme montrant les différentes technologies et l'évolution des rendements des cellules au niveau de laboratoire.

II.6 Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma équivalent électrique ci-dessous.

On peut considérer le cas d'une cellule photovoltaïque idéale comprenant une source de courant et une diode en parallèle.

La source de courant modélise le courant généré par les photons et la diode qui modélise la jonction PN.

Pour envisager le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, le circuit équivalent doit intégrer:

Une résistance R_s , qui modélise les pertes résistives au sein de la photopile et donc les métallisations ; Une résistance parallèle R_p modélisant les courants de fuite qui court-circuitent la jonction (fuite par les bords de la cellule est au niveau de la jonction).

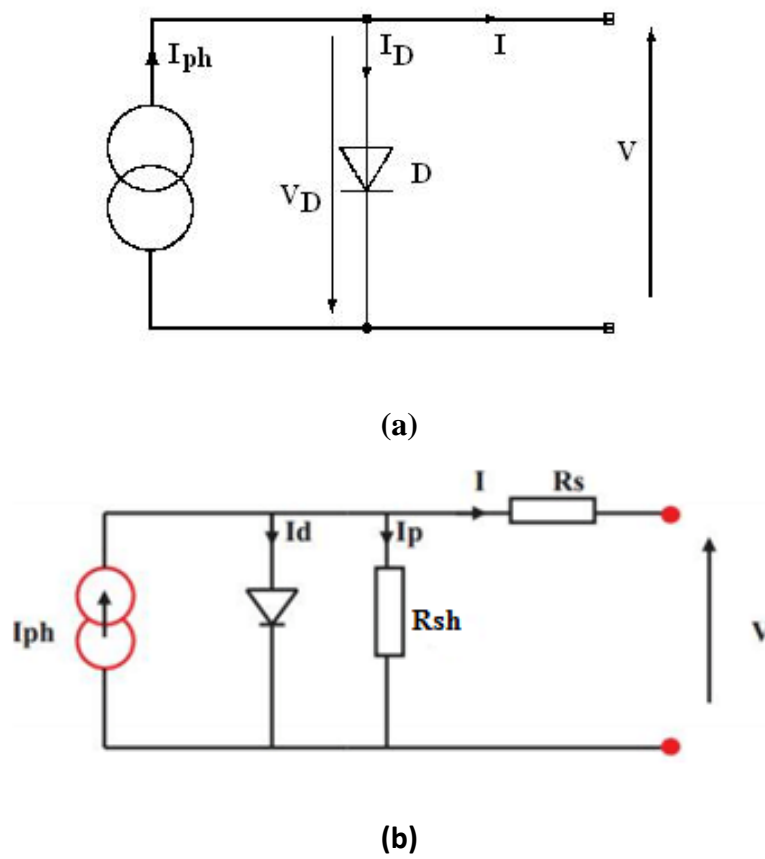


Figure II -12 : Schéma électrique de la cellule solaire. (a) :idéal , (b): réel

Selon le schéma équivalent d'une cellule solaire dans la figure (II -12), on applique les lois de Kirchhoff , le courant I débité par la cellule est la somme algébrique de trois courants:

$$I = I_{ph} - I_D - I_p \quad (II -1)$$

La tension aux bornes de la diode est:

$$V_D = R_p I_p = V + R_s I$$

Où I_p représente le courant traversant la résistance parallèle, R_p

$$I_p = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (\text{II} - 2)$$

Le courant de la diode I_D s'écrit donc sous la forme

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV_D}{nKT}} - 1 \right) \quad (\text{II} - 3)$$

En remplaçant dans (II -1), les expressions des courants (II -3) et (II -2), on obtient l'équation de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \left[\frac{q(V + R_s I)}{nKT} \right] - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (\text{II} - 4)$$

n : est le facteur d'idéalité de la diode.

K : Constante de Boltzmann.

T : Température.

q : La charge de l'électron.

V : La tension appliquée à charge utilisatrice R_c .

I_0 : Courant de saturation de la diode (I_s).

R_s : charge utilisatrice .

R_{sh} : résistance shunte

I_0 : Courant de saturation de la diode (I_s).

$I_L = I_{ph}$:courant photonique

II.7 Paramètres des cellules photovoltaïques

Les paramètres propres à la cellule photovoltaïque (V_{co} , I_{cc} , FF, η), extraits de la caractéristique courant-tension $I(V)$, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

Le courant d'une cellule depuis le court-circuit jusqu'au circuit ouvert est [28]:

$$I(V) = I_{ph} - I_{obs}(V) = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (II. 5)$$

I_{ph} : courant photonique en Ampères.

I_{obs} : courant d'obscurité en Ampères.

V : Tension aux bornes de cellule en Volts.

I_s : Courant de saturation de la diode en Ampères.

q : Charge élémentaire d'un électron ($q = 1,602 \cdot 10^{-19}C$).

K : Constante de Boltzmann ($K = 8,62 \cdot 10^{-5}eV.K^{-1}$).

T : Température en Kelvin.

II.7.1 Courant de court-circuit, I_{cc} :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent (figure II.3)). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

$$(V = 0) \quad I = -I_{ph} = I_{cc} \quad (II. 6)$$

II.7.2 Tension à circuit ouvert, V_{oc} :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

La tension V_{oc} est obtenue à partir de la relation (II.5), $I(v)=0$:

$$V_{oc} = \frac{kT_c}{q} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (II -7)$$

$\frac{kT_c}{q}$: représente le potentiel thermodynamique

q : charge de l'électron ($1.9 \cdot 10^{-19}$ Coulombs).

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

I_{ph} : le courant photonique

I_s : courant de saturation..

T_c : température absolue (en kelvin).

II.7.3 Le maximum de puissance P_m :

Le maximum de puissance disponible est défini par la tension V_m et le courant I_m .

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (\text{II -8})$$

Avec :

V_m : la tension correspondante à la puissance maximale fournie,

I_m : le courant correspondant à la puissance maximale fournie.

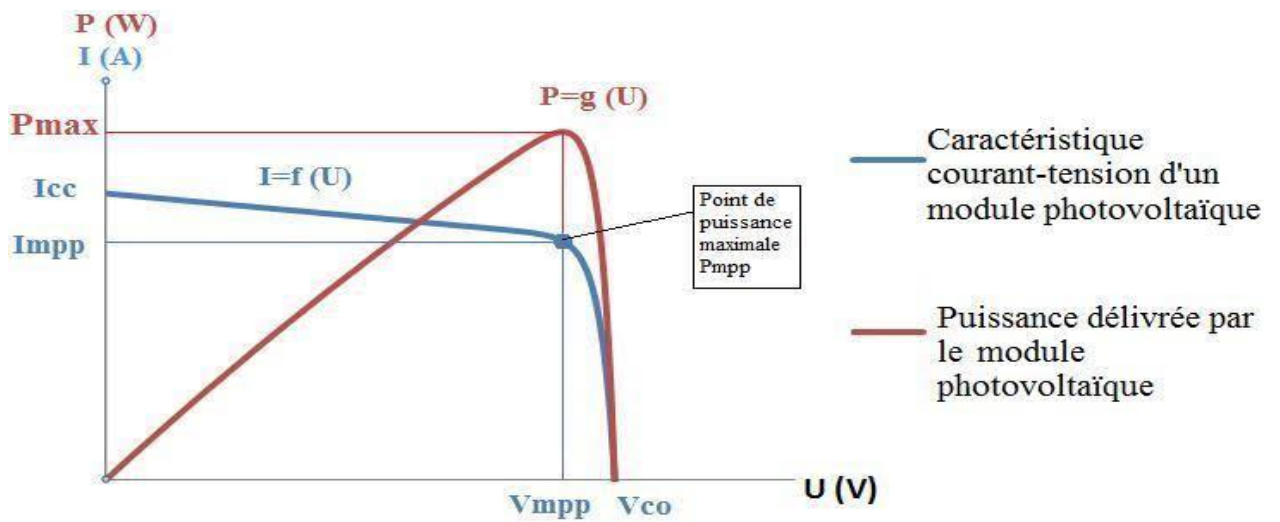


Figure II -13 : Caractéristique courant-tension et la puissance délivrée par module photovoltaïque

II.7.4 Facteur de forme, FF :

La puissance fournie au circuit extérieure par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale pour un point de fonctionnement P_m (I_m et V_m) de la courbe courant- tension.

Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{V_{oc} I_{cc}} \quad (II - 9)$$

Dans le cas d'une cellule idéale le facteur de forme **FF** ne peut pas être supérieur à 0.89 du fait de la relation exponentielle liant courant et tension.

II.7.5 Le rendement, η :

Le rendement η des cellules photovoltaïques désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre le rapport maximal délivré par la cellule et la puissance lumineuse incidente.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{incident}} = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{incident}} \quad (II -10)$$

Où bien:

$$\eta = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{oc}}{P_{incident}} \quad (II -11)$$

II.8 Influence des paramètres sur la caractéristique courant tension

II.8.1 Influence de l'éclairement solaire

L'augmentation d'ensoleillement (flux lumineux) se traduit par un déplacement de la caractéristique $I=f(V)$ suivant l'axe des courants.

L'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert étant donné que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique [29].

L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ de la cellule solaire est représentée sur la figure (II -14), pour une température fixe $T=25c^{\circ}$.

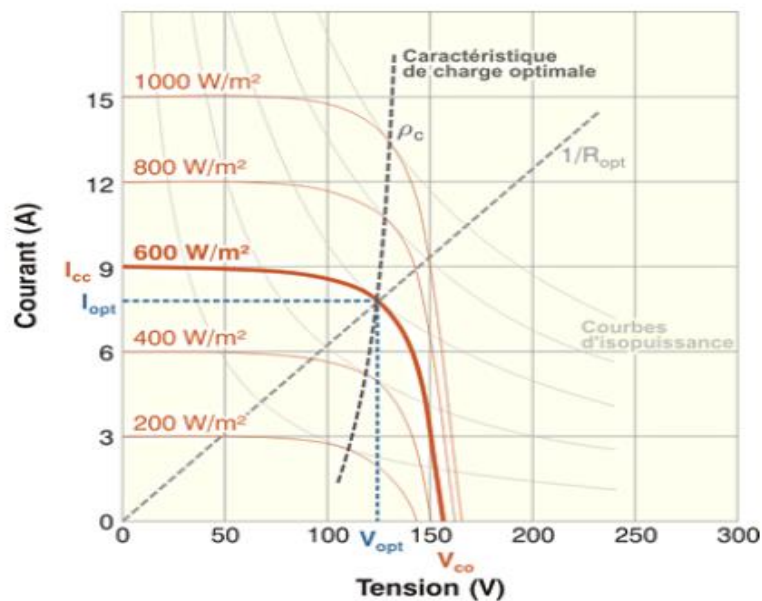


Figure II -14 : Influence de l'ensoleillement sur les courbes $I(V)$ et $P(V)$ [28]

G. Notton et al [30] ont présentés quelques exemples de courbes $I-V$ mesurées et modélisées en fonction de l'éclairement solaire , les données estimées en fonction des données expérimentales, ainsi que les valeurs des coefficients statistiques obtenus, figure II.15.

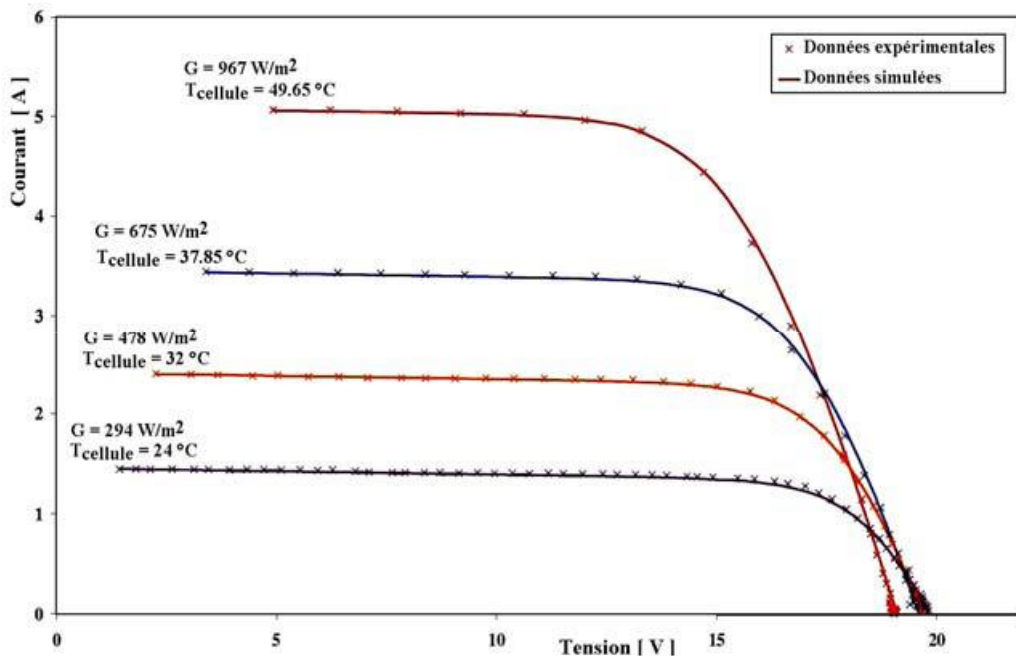


Figure.II. 15: Quelques courbes I –V expérimentales et simulées [30]

II.8.2 Influence de la température

La température est une grandeur liée à certaines propriétés des corps (volume massique, résistivité électrique, ...). Selon les travaux de Skoplaki et Palyvos [31] la température d'un module photovoltaïque varie en fonction de l'irradiance solaire, de la vitesse des vents, de la température ambiante et des propriétés du matériau de fabrication des modules.

La variation de température d'un module affecte pratiquement toutes ses performances électriques : courant de court-circuit, point de puissance maximale, tension en circuit-ouvert, facteur de forme et rendement.

Les coefficients de température traduisent les variations de ces performances en fonction de la température.

La figure II.16 présente un capteur de température de type PT100 utilisé pour la mesure des températures des modules que nous étudions. Ils sont fixés au centre des faces arrière des modules caractérisés.



Figure II.16: Capteur de température de type sonde PT100

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant-tension d'un semi-conducteur. Pour une température qui change, on peut voir que la variation de la tension change beaucoup plus que le courant. Ce dernier varie très légèrement.

L'influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V de la cellule solaire est représentée sur la figure II. 17 , pour un éclairement fixe $E = 1000\text{W/m}^2$. [32] .

Ainsi, la courbe I-V résultante est obtenue en additionnant les tensions de telle manière que:

$$V_{\text{module}} = N_s \times V_{\text{cell}}$$

avec:

N_s : nombre des cellules

V_{cell} : Tension d'une cellule

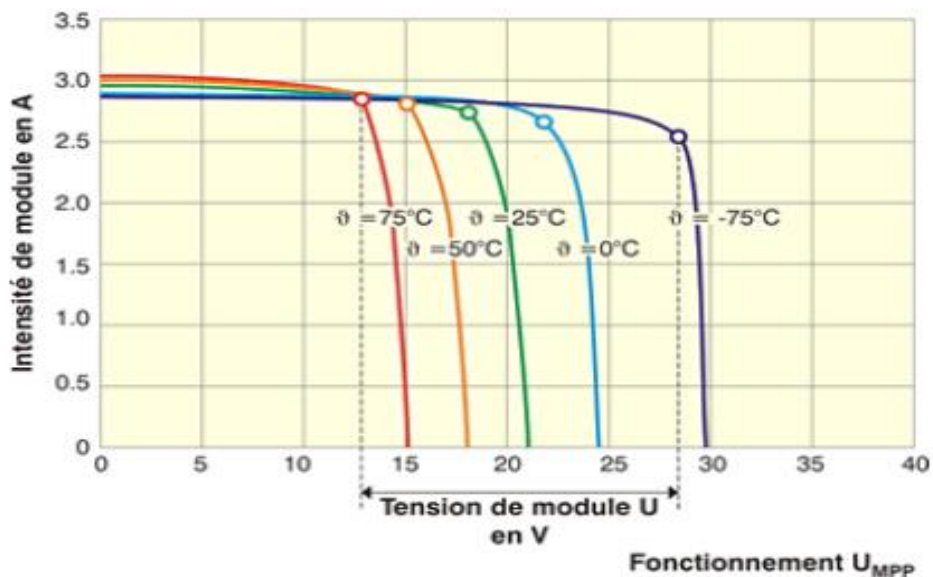


Figure II -17: Influence de la température sur les cellules photovoltaïque

Toufik Sebbagh [33] a étudié l'impact des facteurs climatiques (température, ensoleillement) sur la puissance des cellules .Il a fait une simulation dans laquelle a maintenu un éclairement constant soit 100w/m2 pour plusieurs valeurs de température soit (0°C, 25°C, 50°C, 75°C, 100°C). L'effet de la température sur I-V et la puissance est représenté dans les figures (II -18 et II -19) .

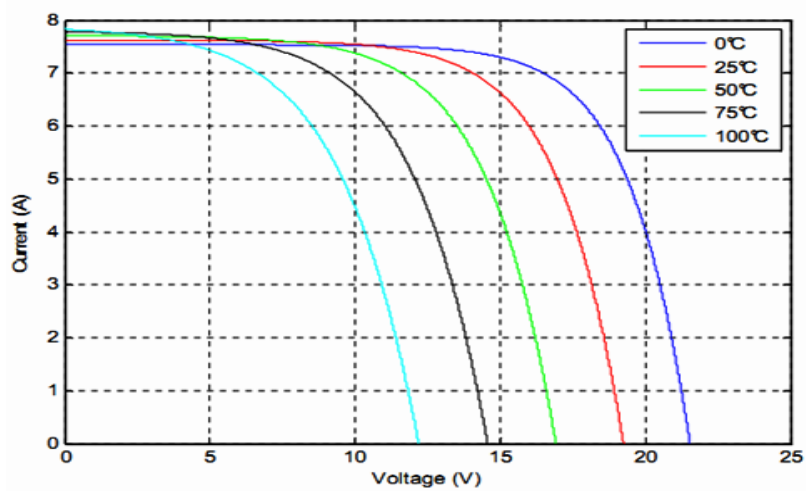


Figure .II -18. Effet de la température sur I-V [33]

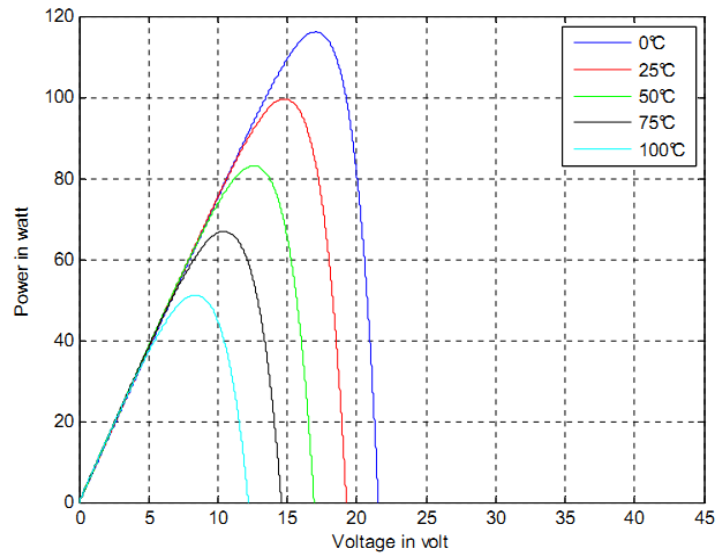


Figure .II -19. Effet de la température sur P-V [33]

Suivant les modèles, ce comportement induit, par degré, une perte de 0.5 % du rendement par rapport au rendement maximum de la cellule (figure II.20) . On comprendra donc tout l'intérêt d'une ventilation correcte à l'arrière des panneaux

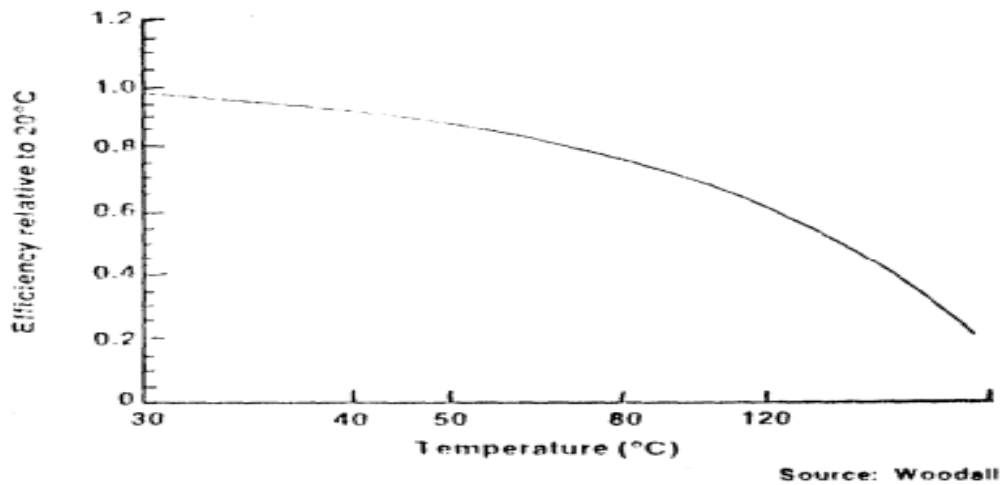


Figure II -20 : Variation du rendement avec la température.

La perte de tension d'un module ou d'une cellule peut être estimée par la formule suivante [34]:

$$U(T^\circ) = U(25^\circ\text{C}) + (\Delta T^\circ * a) \quad (\text{II -12})$$

Avec :

ΔT : augmentation de température par rapport aux conditions STC (25°C)

a : coefficient de température V_{oc} [mV/K], valeur fournie par le fabricant

Courant photonique:

Le courant photonique (Photo-courant) **I_{ph}** en fonction de la température est donné par [35, 36].

$$I_{ph} = I_{CTS} \left(\frac{G}{G_{CTS}} \right) \cdot [1 + \alpha_1 (T - T_{CTS})] \quad (\text{II -13})$$

Avec G et G_{CTS} , qui sont respectivement l'éclairement solaire sur le module et dans les Conditions de Test Standard (**CTS** ou **STC** en Anglais).

I_{CTS} est le courant photonique dans les Conditions de Test Standard.

α_1 est d'environ à 0,05 % du courant de court-circuit .

La température de cellule est calculée à partir de la température ambiante T_a en utilisant la **NOCT** (Normal Operating Cell Temperature) donnée par les fabricants de modules photovoltaïques:

$$T = (T_a + NOCT - 20) \cdot \frac{G}{800} \quad (\text{II - 14})$$

Selon dans [37], le NOCT est déterminé pour les conditions suivantes:

- Une vitesse de vent à la hauteur du module $v = 1$ m/s,
- Une température ambiante $T_a = 20$ °C
- Un éclairement hémisphérique $G = 800$ W/m².

II.9 Conditions de test des modules photovoltaïques

Les fabricants indiquent généralement les caractéristiques de leurs modules photovoltaïques dans les conditions suivantes :

- **STC** (Standard Test Conditions) : irradiance solaire de 1000 W/m², une température de jonction des cellules de 25°C, et un spectre solaire AM de 1,5.
- **NOCT** : (Nominal Operating Cell Temperature), c'est la température de jonction de la cellule, ce paramètre caractérise le fonctionnement thermique du module : il correspond à la température de jonction des cellules pour une irradiance solaire de 800 W/m², une température ambiante de 20°C et une vitesse de vent moyenne de 1 m/s,

Tableau II.1 caractéristiques électrique d un panneau solaire photovoltaïque

Electrical Characteristics	
Product code	SGM-100W
Maximum power(Pmax)	100W
Voltage at Pmax(Vmp)	17.8
Current at Pmax(Imp)	5.62
Open-circuit voltage(Voc)	22.3
Short -circuit current(Isc)	6.07
Power temperature coefficient	-0.48%/°C
Voltage temperature coefficient	-0.34%/°C
Current temperature coefficient	+0.015%/°C
Cells Efficiency(%)	18.43%
The maximum system voltage	1000VDC(IEC)
Output power tolerance	±3%

*Measured at STC Conditions: Irradiance:1,000W/m² - AM1.5 Spectrum - Temperature:25°C
Electrical parameters may vary by ±5%

Pour un module BP585F , les caractéristiques sous les conditions standards (1000 W/m², masse optique: AM 1.5, Température de cellule: 25 °C) sont donnés dans le Tableau II.2. [13]

Puissance nominale	80 W
Tension au MPP (V_{opt})	18,00 V
Courant au MPP (I_{opt})	4,72 A
Courant de court-circuit (I_{sc})	5.00 A
Tension de circuit ouvert (V_{co})	22.03 V
Facteur de forme (FF)	0.771
Nombre de cellules en série	36
Coefficient de sensibilité de la tension à la température	-0.086V/K
Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température	+0,0025 A/K

Tableau II.2. Caractéristiques du module BP585F

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présente des différents types des cellules photovoltaïques et l'évolution de rendements de ces types de cellules .Cette croissance est due en partie aux avancées technologiques enregistrées dans la production des cellules photovoltaïques sur ses différentes filières.

Nous avons présenté aussi les différentes zones de fonctionnement et quelques études bibliographiques pour l'influence des différents paramètres sur la caractéristique I (V), P (V) comme l'éclairement et la température.

CHAPITRE III
Modélisation et caractérisation d'un
PV solaire

Dans ce chapitre, nous allons présenter quelques résultats numériques concernant le calcul des rayonnements solaires au site de M'Sila pour l'utiliser au calcul numérique concernant le panneau solaire photovoltaïque proposé pour notre étude.

III.1. Calcul des rayonnements solaires

Pour calculer l'intensité des rayonnements solaires, nous avons choisi le site de M'Sila et nous avons élaboré un programme de calcul. Il suffit d'entrer les coordonnées géographiques et le numéro de jour dans l'année et l'inclinaison du PV solaire par rapport à l'horizontale.

L'analyse du rayonnement solaire permet d'exploiter la quantité d'énergie produite par le soleil pour un jour, un mois, ou une année. Le rôle d'inclinaison saisonnière des capteurs photovoltaïque est très important pour l'évolution de cette quantité d'énergie. Rappelons aussi que l'évolution de ces rayonnements dépend des caractéristiques du site choisi tel que la latitude, l'altitude et la longitude. Nos calculs à l'aide d'un code de calcul écrit en langage Fortran ont été effectuées au site de M'sila. Tous ces paramètres nous permettent d'expliquer les résultats obtenus dans les mesures d'éclairement solaire.

Coordonnée géographique de site de M'Sila

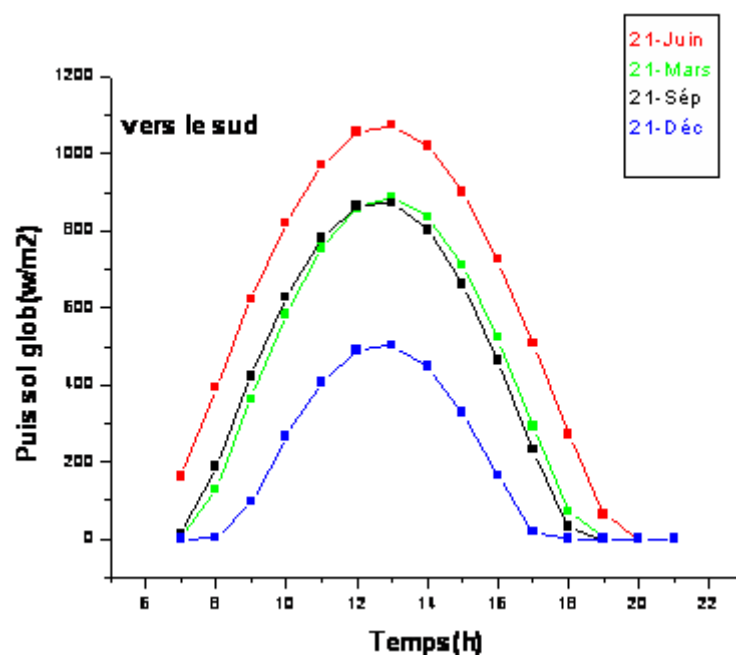
Latitude : 35° 42' Nord

Longitude : 4° 32' East

III.1.1. Variation temporelles des puissances solaire globale incident sur un plan horizontale

Avec les Coordonnée géographique de site de M'Sila , la figure (III.1) représente la variation des rayonnement solaire globale (calculer à l'aide d'un programme écrit en langage Fortran) au cours de la journée avec un angle d'inclinaison ($\beta=0$) où le capteur et dirigée vers le vers le sud, (Azimuth=0).

Nous notons que la plus grande valeur du rayonnement solaire est à midi dans tous les saisons , et cela parce que l'intensité du rayonnement solaire est perpendiculaire à la surface de la terre à ce moment de la journée et au jour de 21 juin (c'est le solstice d'été).



Figures III.1 : Rayonnement solaire globale journalier à angle d'inclinaison ($\beta=0$).

III.1.2. Effet de l'angle d'inclinaison

Avant de commencer notre travail, nous avons effectué une chaîne de tests de calcul numérique pour trouver l'angle d'inclinaison optimale du capteur (jour correspondant 21 Mars). Nous avons également fixé l'orientation du capteur vers le sud (Azimuth = 0),

puis nous avons calculé la puissance solaire globale pour des différents angles d'inclinaison (0° - 90°), Figure (III.2)

On remarque dans cette figure que le flux solaire globale atteint une valeur maximale d'angle situé entre 35° et 40° , donc ceci l'angle optimale qui correspond à la latitude de M'Sila ($35^\circ, 42$).

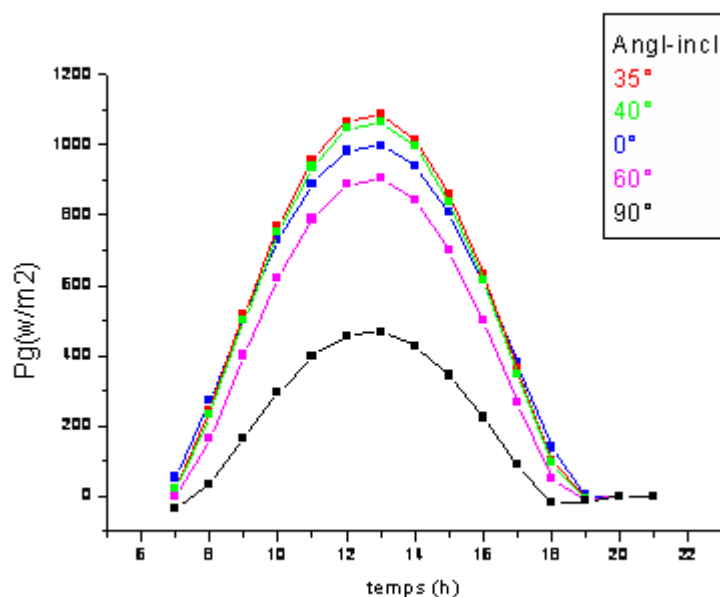


Figure III.2 : Rayonnement solaire global journalier pour différents angles d'inclinaison

III.2 Caractéristiques courant-tension (I-V) d'un PV

Pour étudier le module PV nous avons choisi le schéma électrique d'une cellule solaire réel présenté dans la figure III.3

Étant donné que les cellules sont montées en série dans un PV solaire, la tension d'un groupe est égale à la somme des tensions de toutes les cellules. Dans les cas d'ombrage, la cellule fonctionne dans le régime inverse et produit une tension négative supérieure à celle de la somme des tensions des autres cellules normales pour un courant supérieur à son courant de court-circuit. Dans ce cas, la tension du groupe devient négative et la diode de by-pass devient passante pour protéger le groupe contre le régime inverse [38].

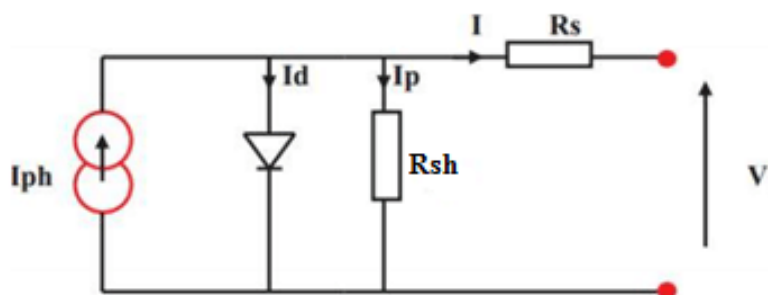


Figure III.3: Schéma électrique d'une cellule solaire réel

Nous rappelons par l'équation (II.4) donnée dans le chapitre II pour déterminer le courant de sortie I en fonction du potentiel V :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left[\frac{q(V + R_S I)}{nKT} \right] - 1 \right) - \frac{V + R_S I}{R_P} \quad (\text{III.1})$$

pour calculer le courant de sortie I on utilise l'algorithme de Newton Raphson [39, 40] L'algorithme de cette méthode est basé sur l'utilisation du développement de Taylor

soit la fonction: $f(x) = 0$

A partir d'une valeur initiale x_0 , de la solution, on cherche une correction δx telle que

$$0 = f(x_0 + \delta x)$$

En faisant un développement de Taylor autour de $x=x_0$, on trouve :

$$0 = f(x_0) + f'(x_0) \cdot \delta x + \left(\frac{f''(x_0) \cdot \delta x^2}{2!} \right) + \left(\frac{f'''(x_0) \cdot \delta x^3}{3!} \right) + \dots$$

Il suffit maintenant de négliger les termes d'ordre supérieur ou égal 2 en δx pour obtenir:

$$f(x_0) + f'(x_0) \cdot \delta x \approx 0$$

On peut alors isoler la correction recherchée :

$$\delta x = - \frac{f(x)}{f'(x)}$$

La correction δx est en principe la quantité que l'on doit ajouter pour annuler la fonction $f(x)$ puisque nous avons négligé les termes d'ordre supérieur ou égal à 2 dans le développement de Taylor, cette correction n'est pas parfaite et on pose:

$$x_1 = x_0 + \delta x$$

Donc:

$$(III.2) \quad x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

Avec:

$f'(x)$: est la dérivée de la fonction $f(x)$

$f(x) = 0$, x_n est une valeur actuelle et x_{n+1} est une prochaine valeur.

on applique l'équation (III.2) sur l'équation (III.1), on a:

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I(V_n)}{I'(V_n)} \quad (III.3)$$

tel que $I = I(V)$

L'algorithme s'arrête lorsque la condition $|I_{n+1} - I_n| < \varepsilon$ est vérifiée (à titre indicatif nous avons choisi dans nos simulations $\varepsilon = 1.e - 8$). Nous rappelons que cette équation qui lie la tension et le courant dépend notamment de la température de la jonction, de l'ensoleillement.

Une fois la solution I trouvée pour une tension V donnée, on relance l'algorithme afin de reconstituer tous les points de la caractéristique $I-V$, [41]

Pour déterminer ces caractéristiques numériquement, nous avons élaboré un code de calcul en langage Fortran pour calculer le courant de sortie I et à l'aide de l'algorithme de Newton Raphson donné dans l'équation (III.3). Pour cela nous avons choisi le module présenté dans le Tableau III.1

Tableau III.1. Caractéristiques du module **BP 585 F**

Nominal Current at P_{\max} ($I_{mp,ref}$)	4.72 A
Warranted minimum P_{\max}	80 W
Short circuit current (I_{cc})	5.0 A
Open-circuit voltage (V_{co})	22.1 V
Temperature coefficient of I_{cc}	$(0.065 \pm 0.015)\%/^{\circ}\text{C}$
Temperature coefficient of V_{co}	$-(80 \pm 10) \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$
Temperature coefficient of Power	$-(0.5 \pm 0.05)\%/^{\circ}\text{C}$
<i>NOCT</i>	$47^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$
PV generator reference efficiency η_r	14%
Area of a single module A_m	0.625 m^2

Le rendement de conversion d'énergie η

C'est le rapport de la puissance maximale générée et de la puissance du rayonnement solaire

$$\eta = \frac{I_m \cdot V_m}{G} = \text{FF} \cdot \frac{I_{cc} \cdot V_{oc}}{G} \quad (\text{III.4})$$

FF est le facteur de forme

$$\text{FF} = \frac{I_{cc} \cdot V_{oc}}{I_m \cdot V_m}$$

III.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

le module PV choisi est le module (BP 585 F) présenté dans le tableau (III.1), nous avons fixé la résistance en série ($R_s=0.2 \text{ Ohm}$) et la résistance shunt ($R_{sh}=1000 \text{ Ohm}$).

III.3.1 Effet de l'éclairement solaire sur courant tension (I-V)

Pour une température constante, les caractéristiques courant tension du module pour des différents irradiances solaires (200 -1000 W/m^2) sont présentées dans la figure III.4 .

On peut noter de cette figure que le courant de court-circuit (I_{cc}) et la tension de circuit ouvert (V_{oc}) sont affectés par l'augmentation du niveau de l'insolation, cela est dû au fait que le rayonnement solaire (photons) augmente l'excitation des électrons libres au niveau des cellules.

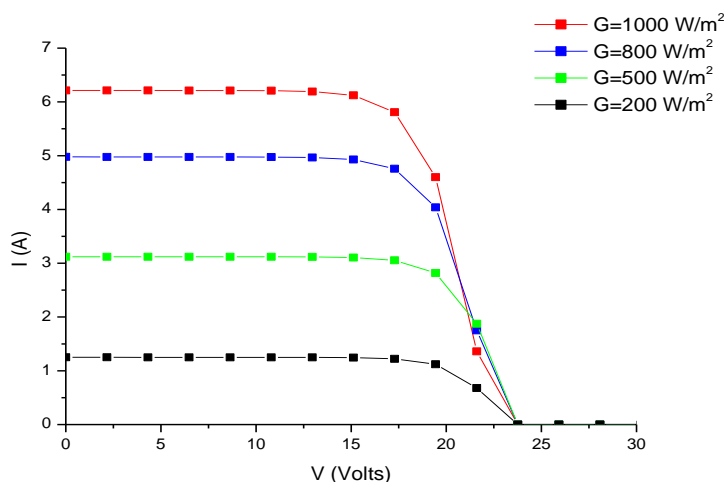


Figure III.4: Variation de courant I en fonction de V pour différents valeurs de rayonnement solaire G

III.3.2 Effet de la température sur I-V

La figure (III.5) montre l'influence de la température ambiante, sur la caractéristique (I-V) pour différentes valeurs de la température ambiante varie de (-10 -, 60 $^{\circ}\text{C}$) et pour un flux solaire constant ($G=800\text{w/m}^2$).

On observe que l'augmentation de la température ambiante provoque une peu diminution du courant du court circuit (I_{cc}), en même temps on remarque une diminution nette de la tension en circuit ouvert (V_{co}).

En outre, l'augmentation de la température ambiante entraîne une diminution de la tension (V_m) et un léger diminution du courant (I_m) et par la suite une baisse remarquable de la puissance maximale (P_m) fourni par le PV comme il est indiqué dans la figure (III.6).

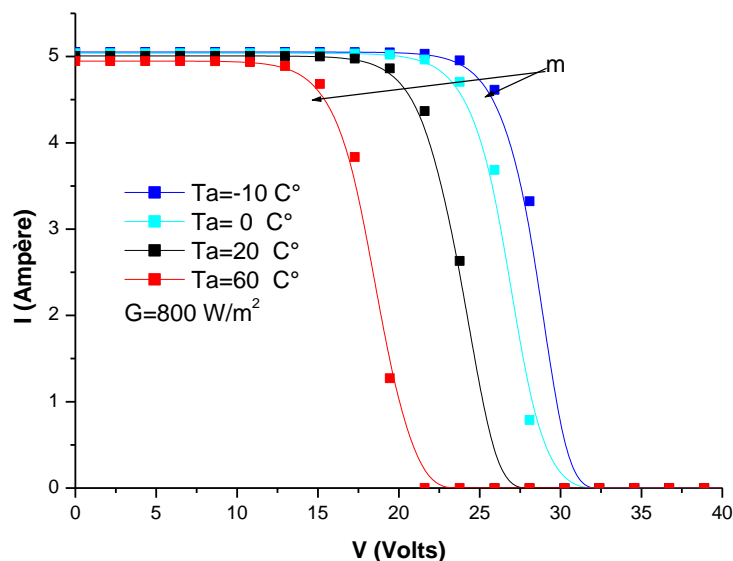


Figure III.5: Effet de la température ambiante sur I-V

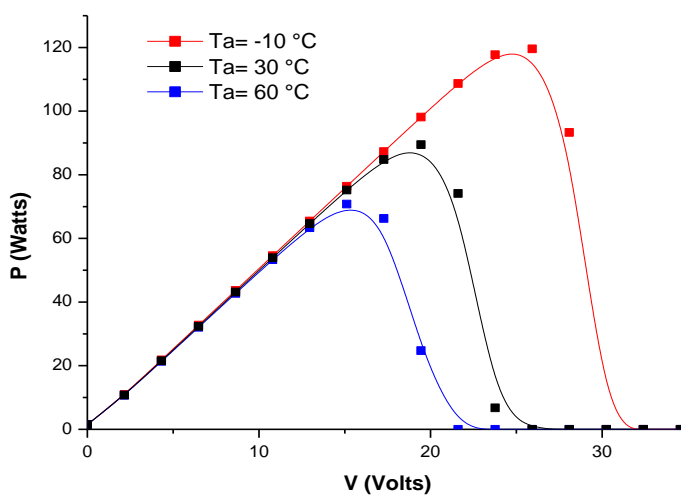


Figure III.6 : Effet de la température ambiante sur la puissance en fonction de tension V: (P-V)

III.3.3 Effet de la température sur η

La figure (III.7) montre l'évolution du rendement du panneau solaire photovoltaïque en fonction de la température. Nous prendrons en compte des températures allant de -10°C à 70°C pour une valeur de flux solaire constante ($G=800\text{ w/m}^2$)

Il est très claire que l'augmentation de la température entraine une diminution rapide dans l'efficacité. En effet, l'efficacité est principalement liée à la puissance qui est également affectée par la température comme il est indiqué dans la relation (III.1).

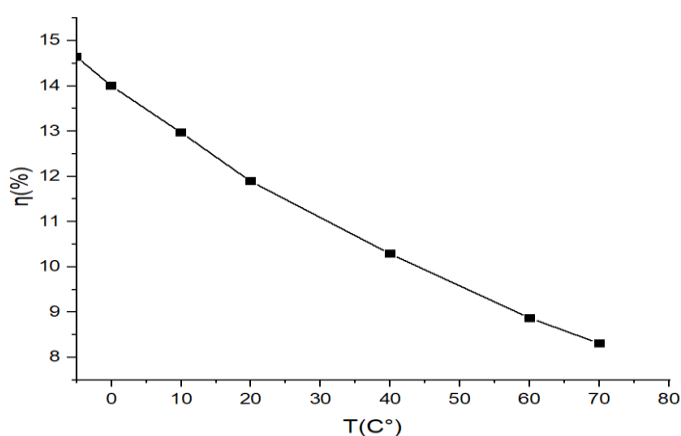


Figure III.7 : Variation du rendement en fonction de température

Conclusion Générale

Avant toute installation de système à énergie solaire, il est nécessaire d'étudier attentivement les différents paramètres de l'installation optimale et d'éviter les erreurs, notamment en ce qui concerne l'irradiation solaire, l'inclinaison et la température...etc.

Dans cette mémoire, nous avons réalisé une étude importante des différents paramètres requis sur un panneau solaire de type BP 585 F dans la zone de M'sila

À l'aide d'un programme écrit en Fortran, nous avons résumé plusieurs résultats, dont le premier concerne l'irradiation solaire, et nous avons constaté que la valeur la plus élevée était à midi à différentes saisons de l'année et au 21 juin (solstice d'été) la valeur la plus élevée pour l'année. Après une série de tests numériques, nous avons évalué que l'angle de l'inclinaison optimale est comprise entre 35 et 40 degrés.

D'après les résultats obtenues, nous concluons qu'il existe une relation directe du rayonnement solaire avec le courant et la tension, opposée à la température ambiante, ce que nous avons constaté qu'elle affecte négativement la tension et le courant du panneau solaire, et donc son énergie maximale diminue et donc une diminution remarquable dans le rendement du panneau solaire étudié.

Bibliographie

- [1] **A.MAAFI**, «A survey on photovoltaic activities in Algeria», Renewable Energy Vol.20, pp 09-17, (2000).
- [2] **J. Bernard**. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [3] **Z. Sen**. Solar energy fundamentals and modeling techniques, Springer. (2008).
- [4] **J. M Chassériau**, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [5] **R. Bernard**, G. Menguy, M. Schwartz. Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation, Paris, 1983.
- [6] **Y.Marouf**, “Modélisation des cellules solaires en In GaN en utilisant Atlas Silvaco”, Mémoire magistère, Université Mohamed kheider-Biskra ,2013.
- [7] **J.M Chassériau**, conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [8] **M. Salmi** « Contribution à la quantification de l’irradiation solaire globale en Algérie et applications aux générateurs photovoltaïques ».Thèse de doctorat, Université de de SÉTIF, 2012.
- [9] **Michel Capderou** , Atlas solaire de l'Algérie, tome 1,2 ;O.P.U. 1986.
- [10] **BOUDEN Abd el Malek**, « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque » , Magister en électronique , Université Mentouri de Constantine,2008.
- [11] **Y. Jannot**. Thermique solaire, Mars 2011.
- [12] **J.A. Duffie, and J.W.Beckman**, Solar Engineering of Thermal Processes, 2ed, Inc, 1991.
- [13] **M. Iqbal**, An Introduction to solar Radiation, Academic Press, Toronto (1983).
- [14] **M.Geyer**, and , W.B.Stine, Power From the Sun (Powerfromthesun.net). J.T. Lyle Center, 2001.
- [15] **P.BESSEMOULIN, J.OLIVIERI**, «Le rayonnement solaire et sa composante », La Météorologie. 8e série- n° 31 pp. 42-59, septembre (2000).
- F.YOUCHEF ETTOUMI, L.NACET, A.ADANE, H.SAUVAGEOT**, «Génération du Gisement quotidien en Algérie», 3ieme Séminaire National en Génie Electrique 29-31 pp 251-256, (2001) Site Internet, adresse eurl : www.mem.algria.org, visité en Octobre 2004.
- [16] **A.MAAFI**, «A survey on photovoltaic activities in Algeria», Renewable Energy Vol.20, pp 09-17, (2000).
- [17] **M.CAPDEROUX**, «Atlas solaire de l’Algérie, Modèles théoriques et expérimentaux», tome1, Volume (1.2), Office des publications Universitaires, Alger (1987)

- [18] **K.MESSAIFA**, «Evaluation de l'Apport Quantitatif des inclinaisons d'un système de photovoltaïque », Enersole'01- 30-31 Oct, ADRAR, pp 255-272,
- [19] **M. R. Yaich**, A.Bouhanik, S. M. A. Bekkouche, A. Malek, and T. Benouaz," Revised Solar maps of Algeria based on sunshine duration", Energy conversion and management, Vol.82, 2014,pp. 114-123.
- [20] **Michel Capderou** , Atlas solaire de l'Algérie, tome 1,2 ;O.P.U. 1986.
- [21] **A.Labouret, P.Cumunel, B. Jean-Paul, B.Faraggi**, "Cellules solaire les bases de l'énergie photovoltaïque", ETSF, Ed Dunod, 2010.
- [22] **S. R .Wenham, M. A. Green, M. E .Watt**, "Applied Photovoltaic Bridge Printer", Sidney, 1994.
- [23] **Y. Marouf**, "Modélisation des cellules solaires en In GaN en utilisant Atlas Silvaco", Mémoire magistère, Université Mohamed kheider-Biskra ,2013
- [24] **F. Lasnier, T.G. Ang**, "Photovoltaic Engineering Handbook", IOP Publishing Ltd. 1980. ISBN 0-85274-311-4
- [25] **Site internet** : <https://energieplus-lesite.be/techniques/photovoltaique3/types-de-cellules/>
- [26] **ANNE LABOURET • PASCAL CUMUNEL JEAN-PAUL BRAUN • BENJAMIN FARAGGI** Cellules solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque Dunod 5e édition ,2010
- [27] Photovoltaics report, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, 2020.
- [28] **Y. Marouf**, "Modélisation des cellules solaires en In GaN en utilisant Atlas Silvaco", Mémoire magistère, Université Mohamed kheider-Biskra ,2013.
- [29] **Z. Bendjellouli**, "Contribution a la modélisation d'une cellule solaire", Mémoire de magister, Université de Bechar, 2009.
- [30] **G. Notton^{1*}, I. Caluianu², I. Colda^{2†} et S. Caluianu²**." Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin",Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°1 (2010) 49 – 62
- [31] **Skoplaki, E. and Palyvos, J.A.** (2009) On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: A Review of Efficiency/Power Correlations. Solar Energy, 83, 614-624.
- [32] **S. M. Ait-Cheikh**, "Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques", Thèse de doctorat, Ecole nationale polytechnique (ENP), Alger, 2007.

- [33] **Toufik Sebbagh** ."Etude de l'impact des facteurs Climatiques (Température, ensoleillement) sur la puissance des cellules" . Conference Paper Université 20 août 1955-Skikda· December 2014
- [34] **site internet** <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/rendement-et-puissance-crete-des-cellules-photovoltaiques/>
- [35] **L.A. Hecktheuer, A. Krenzinger, C.W.M. Prieb**, 'Methodology for Photovoltaic Modules Characterization and Shading Effects Analysis', Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, Vol. 24, N°1, pp. 26 -32, 2002.
- [36] **U. Eicker**, 'Solar Technologies for Buildings', New York Wiley, 2003
- [37] **M. Mattei, G. Notton, C. Cristofari, M. Muselli and P. Poggi**, 'Calculation of the Polycrystalline PV Module Temperature Using a Simple Method of Energy Balance', Renewable Energy, Vol. 31, N°4, pp. 553 - 567, 2006.
- [38] **Mohammed Telidjane.**" Modélisation des panneaux photovoltaïques et adaptation de la cyclostationarité pour le diagnostic ", Thèse de doctorat de l'université de Lyon, 2017
- [39] **Adel et Shahat** « PV cell module modeling and simulation for smart grid applications » Journal of Theoretical and Applied Information Technology, JATIT all rights reserved, pp 9-20, 2010.
- [40] **Kelali Kamelia.** "modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative", mémoire de magister en électrotechnique, ummto (Tizi-ouzou), 2012
- [41] **Mohammed Telidjane.**" Modélisation des panneaux photovoltaïques et adaptation de la cyclostationarité pour le diagnostic ", These de doctorat de l'université de Lyon, 2017

Résumé:

Dans ce travail, nous avons réalisé une étude numérique sur l'effet de la température sur un panneau solaire PV. Dans l'étude théorique, nous avons mentionné plusieurs types de panneaux solaires photovoltaïques et leurs propriétés. Pour cela, nous avons élaboré un programme numérique écrit en langue Fortran qui se compose de deux parties - la première partie pour le calcul de l'intensité du rayonnement solaire dans la ville de M'sila, ainsi que l'effet de l'angle d'inclinaison sur le panneau solaire, la deuxième partie de ce programme concerne l'étude de l'effet de la température sur le courant électrique, la tension et le rendement du panneau solaire à l'aide de l'algorithme de Newton Raphson. Les résultats obtenus étaient en conforme à certains des résultats précédemment obtenus par des chercheurs dans ce domaine.

Absract :

In this present work, a numerical study of the temperature effect on a solar PV panel is presented. In the theoretical study, we mentioned several types of photovoltaic solar panels and their properties. For this, we have developed a numerical program written in Fortran language consists of two parts: the first part is to calculate the solar radiation intensity in the city of M'sila, as well as the effect of the inclination angle on the solar panel, the second part of this program concerns the study of the temperature effect on the electric current, the voltage and the efficiency of the solar panel using the Newton Raphson algorithm. The results obtained were in according and approximated to some of the results previously obtained by researchers in this field.

ملخص:

لقد قمنا في عملنا هذا بدراسة عددية على تأثير درجة الحرارة على اللوح الشمسي الكهروضوئي . في الدراسة النظرية تطرقنا إلى ذكر عدة أنواع من الألواح الشمسية الكهروضوئية و خصائصها بالإضافة إلى التكنولوجيا الحديثة وتطرقنا أيضا إلى تأثير درجة الحرارة على مختلف خصائص اللوح الشمسي . من أجل ذلك ، لقد قمنا بإنشاء برنامج عددي بلغة " فورتران " يتكون من جزئين ، الجزء الأول خاص بحساب شدة الإشعاع الشمسي بمدينة المسيلة وكذلك تأثير زاوية ميل اللوح الشمسي ، والجزء الثاني من هذا البرنامج خاص بدراسة تأثير درجة الحرارة على كل من التيار الكهربائي والجهد ومردود اللوح الشمسي باستعمال خوارزمية نيوتن رافسون . ان النتائج المتحصل عليها كانت مطابقة وتقريبية لبعض النتائج المتحصل عليها سابقا من قبل الباحثين في هذا المجال.