

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

UNIVERSITE DE MENTOURI CONSTANTINE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

N°de série :

THESE
Présenté pour l'obtenir
Du Diplôme de Magistère en Electronique
Option
INSTRUMENTATION

Par

ZOUACHE FOUJIL

INTITULE

**ETUDE DE LA CONCENTRATION SOLAIRE SUR LES
PERFORMANCES DES SYSTEMES
PHOTOVOLTAIQUE**

Devant le jury :

Président : M .MARIR, Professeur Université Mentouri Constantine
Rapporteur : B.E. MARIR, Professeur Université Mentouri Constantine
Examineurs : A.N. KAABI, Professeur Université Mentouri Constantine
: A.B. HAOUM : Maître de conférence Université Mentouri Constantine

2009

Remerciement

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Ce travail a été effectué au département d'électronique, faculté des sciences de l'ingénieur, sous la direction de monsieur Bader-Eddine Marir, Professeur à l'Université de Constantine. Je lui exprime particulièrement toutes mes reconnaissances pour m'avoir fait bénéficier de ces compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.

J'exprime mes sincères remerciements à Madame M. Marir, Professeur à l'université de Constantine, d'avoir accepté de présider le Jury de cette thèse.

Je remercie sincèrement monsieur Kaabi Abd el Nacer, Professeur à l'université de Constantine d'avoir accepté de faire partie du Jury.

Je remercie messieur Abdesslame Haouam Maître de conférence à l'université de Constantine d'avoir accepté de faire partie du Jury.

Je remercie tous les enseignants qui me contribuent à mon travail,

Enfin, j'adresse mes vives reconnaissances à tous les membres de (LE-MCE), sans oublier les étudiants de Magister.

FOUDIL

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents

A mes frères et mes sœurs

A tous ma famille

A mon encadreur Mr Bader-Eddine Marir

A tous mes collègues et mes amis partout

A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science

et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien

et la prospérité de l'humanité.

FOUDIL

SOMMAIRE	
CHAPITRE I	
<i>GENERALITES SUR LE GISEMENT SOLAIRE</i>	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Notions de gisement solaire	3
I.2.1. Définitions générales	3
I.2.2. Coordonnées terrestres	3
a) Longitude	4
b) La latitude.....	4
c) L'altitude.....	4
I.2.3. Mouvement de la terre autour du soleil	5
a) les coordonnées horaires :.....	5
b) les coordonnées horizontales	6
c) La déclinaison du Soleil	6
I.3. Le rayonnement solaire :	7
I.3.1. Spectre du rayonnement	7
I-3.2. Structure de l'atmosphère.....	8
I-3.3. Spectre hors atmosphère.....	9
I-3.4. Le rôle de l'atmosphère	9
I-3.5. Atmosphère standard	9
I-3.6. Masse d'air	9
I-3.7. Les différents types de rayonnement	10
a) Le rayonnement global	10
b) Le rayonnement direct	11
c) Le rayonnement diffus	11
d) L'albédo	11
I.4. Les expressions des rayonnements solaires sur un plan quelconque...	12
I.4.1. Rayonnement direct	12
I-5. Quelques grandeurs photométriques	15
a) Le flux.....	15
b) L'intensité lumineuse	15
c) L'éclairement.....	15
d) L'exposition	15
e) La luminance.....	15
I.6. Conclusion	16
CHAPITRE II	
<i>GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES</i>	
I-INTRODUCTION	17
II- Physique de la cellule photovoltaïque	17
II.1-Le semi-conducteur	17
II .2-Description de la cellule solaire.....	18
II-3.Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	19
II-4. Modèle réel d'une cellule photovoltaïque	20

II-4-1. Paramètres des cellules photovoltaïques.....	21
a)- Courant de court-circuit, ICC	21
b)-Tension à circuit ouvert, VOC	22
c)- Puissance débitée	22
d)- Facteur de forme, ff	22
e)-Le rendement.....	23
II-4-2- Méthode de détermination de la résistance série	23
II-4-3 -Détermination de la résistance shunt	25
IV- L'équation caractéristique de la cellule.....	26
IV-2- Les zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque.....	27
IV-3- Les paramètres qui influent sur la caractéristique $I = f(V)$	28
a) Influence de l'éclairement	28
b) Influence de la température	29
c) Influence de la résistance série	30
d) Influence de la résistance shunt	31
e) Influence de facteur de qualité	31
V-1.Les modules photovoltaïques.....	32
a) Mise en série	32
b) Mise en parallèle	33
c) Mise en série parallèle.....	34
VI -Présentation des différents types de cellules photovoltaïques	35
a)-Les photopiles à couche actives épaisses.....	36
b)-Cellules en couches minces.....	37
c) les cellules organiques.....	39
V –Conclusion.....	39
CHAPITRE III	
<i>LE SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUE A CONCENTRATION</i>	
III .1.Introduction	40
III .2-Absorption optique d'une photopile solaire	40
III-2.1.Coefficient d'absorption de divers semi-conducteurs	42
III-3.Les concentrateur et les système associés.....	42
III-4.La concentration du rayonnement solaire	42
III -4 .1- Différents types de capteurs à concentration.....	42
III -4 .2.Concentration à réflexion.....	42
a) Réflecteur cylindro-parabolique.....	43
b) Réflecteur parabolique.....	43
d) Capteurs solaires fixes à concentration.....	43
III -4 .3. Système a réfraction ou a lentille de Fresnel	44
III-4.4. Avantages de la réfraction a la précision de la fabrication	46
III-5. Les panneaux solaires à concentration	48
III-6.Le Taux de concentration	48
III-7.Influence de la concentration sur les paramètres de la cellule.....	48
III-7.1.Limites de la concentration	50
III .7-2 .Effet de la température	50
III .7-3.Effet de la résistance série de la cellule sous la concentration	50
III-8.Conclusion	52

_CHAPITRE IV	
<i>SIMULATION DE FONCTIONNEMENT DE SYSTEME PV A CONCENTRATION</i>	
IV-1 -Introduction	53
IV-2-Le modèle mathématique de la cellule solaire	53
IV-3-L'organigramme principal	53
IV-4-Les' influence des paramètres des cellules sur les caractéristiques courant-tension	56
a)-L'influence de l'éclairement.....	56
b)-L'influence de la température	56
c)-L'influence de la résistance série.....	57
d)-L'influence de la résistance parallèle	58
IV-5-La caractéristique I (v) sous concentration	58
IV-6- Résultats obtenus pour les cellules sous la concentration	59
IV-7 -L'influence de la concentration solaire sur la tension de circuit ouvert	61
IV-8 -L'influence de la concentration solaire sur le rendement.....	63
IV-9.La variation du rendement de conversion des cellules pour forte concentration.....	66
IV-10.La comparaison entre les cellules solaires sous la concentration	68
IV-11.Conclusion	68
IV-12. Partie expérimentale.....	69
IV-12.1. Introduction	69
IV-12. 2. Procédures d'installation.....	69
a)-La puissance débitée.....	69
IV.12.3 .Résultat d'expérience	71
IV.12.4 .Mesure de l'ensoleillement	71
IV-12.5 .Courbe I (V) d'une cellule solaire	82
Conclusion générale.....	83
Les annexes.....	
Liste des figures.....	
Liste des symboles.....	
Référence bibliographique.....	
ملخص.....	
Abstract.....	
Résumé.....	

Introduction générale

L'énergie solaire est l'énergie renouvelable par excellence. Respectueuse de l'environnement, elle présente de nombreux avantages spécifiques en raison notamment de l'épuisement prévisible des ressources d'énergies fossiles et de la montée des problèmes liés à la dégradation de l'environnement.

Mais ,pour des raisons à la fois technique et économiques , cette nouvelle source d'énergie électrique a tardé à s'imposer en dehors du domaine spatial .Cependant , au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts , et même est devenue familière des consommateurs à travers de nombreux de faible puissance faisant appel montres ,calculatrices , balises radio et pompes ,réfrigérateur solaire .

Plusieurs problèmes de recherche doivent être résolus pour amener ces systèmes au degré de maturité suffisant et en faire des produits industriels à part entière qui pourraient aussi être comparés à des systèmes (grand public).

Dans ce cadre, l'énergie photovoltaïque (PV) bien que connue depuis de nombreuses années pour pouvoir être une source d'énergie électrique ayant de grandes possibilités pouvant aller de quelques milliwatts au mégawat, ne se développe pas dans de grandes proportions. Les problèmes qui restent à résoudre concernent autant le matériau de conversion qui reste cher que la chaîne de conversion électrique qui présente beaucoup de pertes par une non optimisation et souvent une utilisation inappropriée de convertisseurs statiques. [1]

Sur la partie système de conversion lui-même, les recherches se résument en deux points : [2]

- Le développement d'un modèle mathématique exacte qui représente la cellule photovoltaïque réelle, et qui reflète l'influence des différentes conditions atmosphériques sur les paramètres de la cellule solaire.

- Le développement d'une méthode d'optimisation efficace qui est apte de déterminer le point de puissance maximale de la caractéristique $I(V)$ de la cellule pour n'importe quel condition d'éclairement et de la température, et quelque soit la nature de changement de ces conditions rapide ou lent.

Sur la partie matériaux, beaucoup d'équipes de recherche travaillent depuis de nombreuses années pour obtenir :

- des rendements élevés associés à des prix de réalisation bas et une tenue des performances en vieillissement sur des durées importantes (10 à 30 ans).[3]
- La réduction de la surface du convertisseur par l'utilisation de système de concentration du rayonnement solaire. .

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire se consacré sur des cellules (silicium poly ,CIGS. ,GaAs ,AlGaAs) sur l'effet de la concentration , le principe de différents concentrateurs et les aspects qui définissent les règles de conception des cellules solaires sous concentration .

Le présent mémoire est organisé en quatre chapitres principaux qui se résument dans ce qui suit :

Dans le premier chapitre, les notions essentielles sur le gisement solaire sont présentées; à savoir les coordonnées terrestres et horaires, le mouvement de la terre autour de soleil et les différents types de rayonnement, ainsi quelques grandeurs photométriques.

Le deuxième chapitre est le générateur photovoltaïque ; ce qui contient dans la première partie la caractéristique de la cellule photovoltaïque, l'influence de certains paramètres sur la caractéristique courante tension de la cellule solaire, ainsi la synthèse d'assemblage des panneaux soit en série, parallèle ou mixte, la présentation des différents types de cellules photovoltaïques .

La plupart des matériaux semi conducteur (CIS. CdTe ,GaAs) ont un front d'absorption raide est des longueurs d'absorption inférieur au (μm) , le principe de différents concentrateurs et les aspects qui définissent les règles de conception des cellules solaires sous concentration ,et l'influence de la concentration sur les paramètres de la cellule seront présentés dans le troisième chapitre.

Le dernier chapitre est consacré à un relevé expérimental de mesures et présentation des résultats de la simulation

A la fin de ce travail nous présenterons une conclusion résumant l'essentiel des résultats obtenus.

I-1.Introduction :

Le soleil est une sphère gazeuse d'un diamètre de 1.391000Km située à une distance moyenne de la terre $L=149.598000\text{km}$. L'orbite terrestre étant presque circulaire, la distance terre soleil varie donc peu au cours de l'année. [3]

Le soleil est l'origine de la quasi-totalité des sources d'énergies utilisées par l'humanité pour ses besoins alimentaires, domestiques et industriels.

Le rayonnement solaire n'est pas toujours perpendiculaire à la surface du sol, les panneaux devraient être installés avec une certaine inclinaison et orientés dans une direction telle que les rayons solaires soient perpendiculaires aux générateurs.

Pour cette raison il est utile de présenter dans ce chapitre une notion générale sur le gisement solaire, ainsi que les influences diminuant l'intensité des rayons du soleil.

I-2 Notions de gisement solaire : [4]**I-2 .1.Définitions générales :**

Notre planète est considérée comme une sphère, tournant sur elle-même. On suppose que (M) est un point de la sphère céleste, la demi-droite qui engendre le point (M) et le centre (O) détermine une **direction (D)**

Sur la figure (I-2) on peut distinguer :

- Les deux directions **OZ–ON** au sens opposé représentent le **Zénith Z** et le **Nadir N**.
- Le grand cercle (**H**) est appelé horizon du lieu.
- Le demi-cercle **ZMN** est le **vertical** de M.
- Le petit cercle (a) d'axe **ZN** passant par M est le cercle de hauteur de la direction (**D**).
- L'axe de rotation de la terre définit deux directions opposées représentées sur la sphère céleste par les pôles céleste P et P'. Le grand cercle A d'axe P et P' est l'équateur céleste de M
- Le demi-cercle **P M P'** est le **méridien** du lieu céleste de M.
- le grand cercle sur lequel se trouve le méridien de M est son **cercle horaire**.
- Le petit cercle (P) d'axe **PP'** passant par M est son **parallèle céleste**.
- Le grand cercle (**m**) méridien du lieu coupe le grand cercle (H) horizon du lieu, en deux points sud (S) et le point nord (N), les grands cercles (A) et (H) se coupent en deux points le point (Est) et le point OUEST (W).

I-2.2. Coordonnées terrestres : [4.5]

La Terre est pratiquement une sphère qui tourne autour d'un axe passant par le pôle Nord (Pn), et le pôle Sud (Ps).

Tout point sur la terre est caractérisé par sa latitude et sa longitude. Ces deux grandeurs représentent les coordonnées géographiques de ce point. Ainsi que par son altitude. **Voir figure (I-2).**

a) Longitude :

La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich 0°) et l'autre déterminé par le lieu envisagé. La longitude sera désignée ici par la lettre « λ ».

✓ Longitude OUEST $\lambda < 0^\circ$

✓ Longitude EST $\lambda > 0^\circ$

Un écart de 1° de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps légitime.

Pour Constantine la longitude est de : 6°

b) La latitude :

La latitude d'un lieu à la surface de la terre est l'angle entre l'équateur et le rayon de la terre passé par le lieu considéré.

La latitude φ comptée de 0° à $+90^\circ$ vers Pn et de -90° vers Ps

Pour la ville de Constantine la latitude est environ de 36° .

c) L'altitude :

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer), on l'exprime généralement en mètre. **[4]**

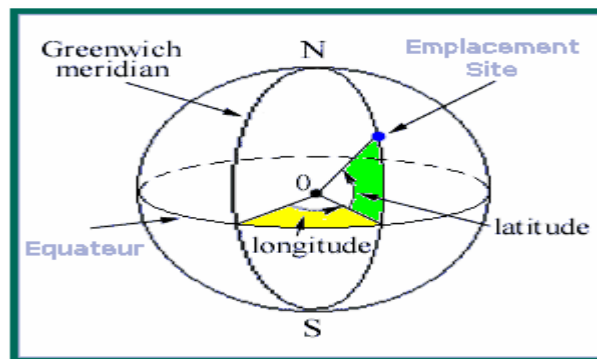


Figure (I-1) : coordonnées terrestres [4]

I-2.3 Mouvement de la terre autour du soleil :

Dans l'espace l'axe de la terre est toujours orienté vers l'étoile polaire. Nous définissons l'équateur céleste comme étant prolongement de l'équateur terrestre dans l'espace.

La trajectoire de la terre autour du soleil s'appelle « l'elliptique ». La distance terre soleil ne varie que $\pm 1,7\%$ par rapport à sa valeur moyenne qui est de $1,49675 \cdot 10^8 \text{ km}$. Cette distance est minimale au début de janvier et maximale au début de juillet. Voir figure (I-3) [7.8]

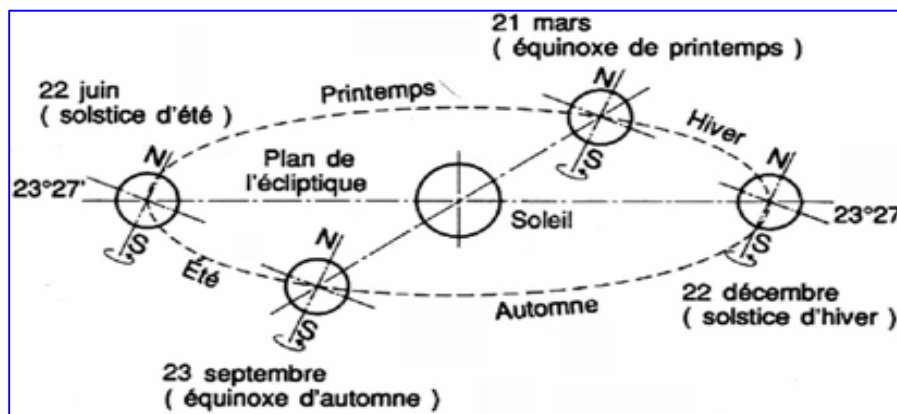


Figure (I-2) : le mouvement de la terre autour de soleil [4]

a) les coordonnées horaires :

Les coordonnées horaires dont le repère sont données par l'axe des pôles et le plan de l'équateur, le méridien du lieu étant pris comme origine. Chaque point de l'espace est repéré par sa **déclinaison** δ et son **angle horaire** ω . voir figure (I-3)

b) **les coordonnées horizontales :**

Les coordonnées horizontales dont le repère sont données par la verticale du lieu (zénith) et le plan de l'horizon. Le méridien du lieu est encore utilisé comme origine. Chaque point de l'espace est repéré par sa **hauteur** γ et son **azimut** ψ . **Voir figure (I-4) [6.7]**

c) **La déclinaison du Soleil :**

L'angle du zénith avec le plan équatorial est la latitude φ du lieu. La déclinaison du Soleil est l'angle de la droite Terre Soleil avec le plan équatorial. Elle varie entre $+ 23^{\circ} 27'$ (au solstice d'été, 22 juin) et $- 23^{\circ} 27'$ (au solstice d'hiver, 22 décembre) ; sa valeur est nulle aux équinoxes (21 mars et 23 septembre) voir figure (I-2). La valeur de la déclinaison au jour J (compté à partir du début de l'année) est approximée, à 1° près, par la formule : **[6.7]**

$$\delta = 23.45 \sin(0.986J - 80^{\circ}) \quad (\text{I.1})$$

Le tableau ci-dessous en donne les valeurs remarquables.

	JOUR	DECLINAISON SOLAIRE
Equinoxe de printemps	21 mars	$\delta = 0^{\circ}$
Solstice d'été	22 juin	$\delta = +23^{\circ}.27$
Equinoxe d'automne	23 septembre	$\delta = 0^{\circ}$
Solstice d'hiver	22 décembre	$\delta = -23^{\circ}.27$

Tab.1.lesvaleurs remarquables de la déclinaison solaire. [4]

Pour un jour fixé, la déclinaison peut être considérée comme constante ; sur la sphère céleste, le Soleil décrit alors un petit cercle, parallèle au plan de l'équateur, avec une vitesse angulaire constante de un tour par 24 heures. À un instant t , exprimé en temps solaire vrai, L'angle horaire du Soleil est simplement (en degrés) :

$$\omega = 15(t - 12) \quad (\text{I.2})$$

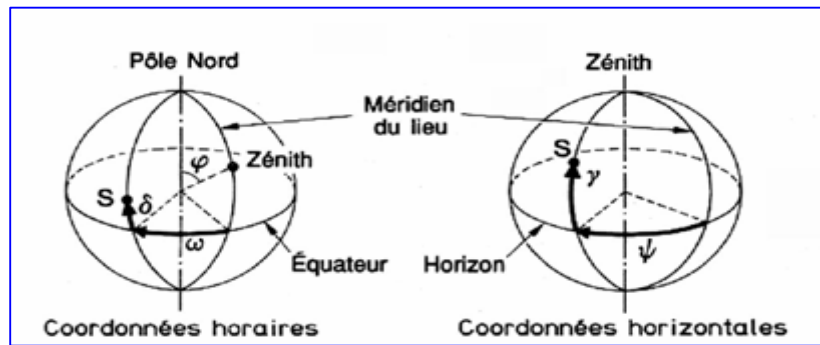


Figure (I-3) : les coordonnées horaires et horizontales [6.7]

I-3. Le rayonnement solaire :

L'énergie du soleil est produite par réactions de fusion thermonucléaire, les noyaux d'hydrogène (protons) s'assemblent en noyaux d'hélium (2 protons + 2 neutrons) avec dégagement d'énergie. Cette énergie est émise dans l'espace par la surface du soleil, notamment sous forme d'ondes électromagnétiques. Le spectre de ce rayonnement

Correspond à l'émission d'un corps noir porté à 5800°K, dont le maximum est situé dans le domaine visible.

L'énergie qui nous vient du soleil représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre.

Outre l'apport direct sous forme de lumière et de chaleur, cette énergie est émise dans l'espace par la surface du soleil, notamment sous forme d'ondes électromagnétique (lumière).

Les seules ressources énergétiques non solaires sont la chaleur de la terre (géothermie), les marées et l'énergie nucléaire, le vent, la biomasse... etc. [4]

I-3.1. Spectre du rayonnement : [8.9]

Le spectre solaire est la distribution spectrale en fonction de la longueur d'onde ou de la fréquence voir figure suivant l'énergie de chaque photon est reliée à la fréquence ν ou à la longueur d'onde λ par la formule suivante :

$$\mathbf{E = h \cdot \nu = h \cdot c/\lambda} \quad (\text{I.3})$$

h : est la constante de planck.

C : étant la vitesse de propagation.

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° 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	$0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$	6.4%
visible	$0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$	48.0%
infrarouge IR	$0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$	45.6%

La figure suivante représente le flux incident en fonction de longueur d'onde.

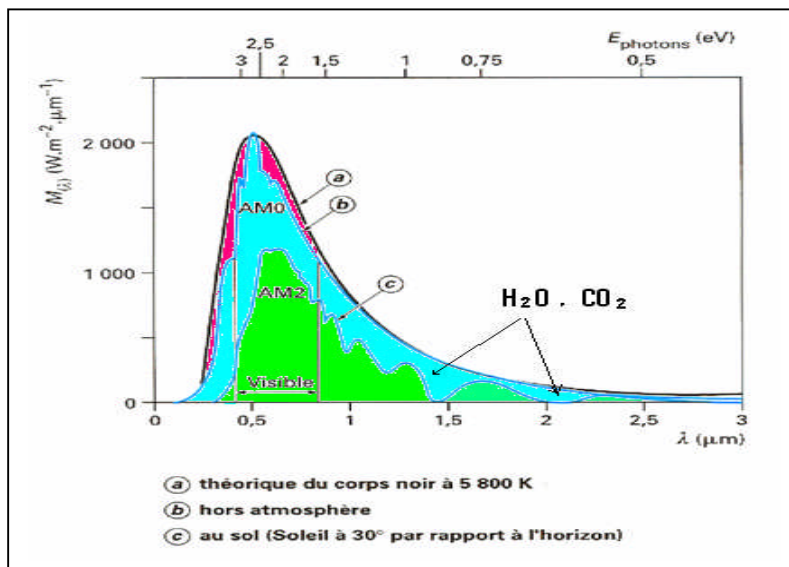


Figure (I-4) : le spectre solaire [3]

I-3.2. Structure de l’atmosphère :

La structure de l’atmosphère influe de façon non négligeable sur le rayonnement reçu. On peut grossièrement séparer

- La troposphère qui s’étend jusqu’à 15Km d’altitude ou la température décroît de 6.5°C par Km pour atteindre -70°c à la base de la couche suivante.
- La stratosphère de 15 à 55 Km , ou la température croit de -70° à 10° .
- La mésosphère de 55 à 80 Km , ou la température décroît a niveau de - +10° à - 80°C .

- L'ionosphère ou la température croît régulièrement pour atteindre 1500°C à l'altitude 300Km.
- L'exosphère au-delà de 700 km qui s'ouvre sans frontière sur l'espace intersidérale.

I-3.3. Spectre hors atmosphère :

Hors atmosphère, la distribution spectrale du rayonnement est parfaitement définie, au voisinage de la planète venue l'éclairement atteint 2600 w m^2 au fur et à mesure qu'on s'éloigne du soleil, sur Jupiter par exemple il n'est plus que de 50 w m^2 . [3.4]

I-3.4. Le rôle de l'atmosphère :

Les couches atmosphériques modifient profondément la distribution spectrale du rayonnement solaire. Il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite des phénomènes complexes d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols (les aérosols seront définis ultérieurement). ainsi la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge. [3.4]

I-3.5. Atmosphère standard :

En ramenant toutes les couches de l'atmosphère dans des conditions normales ($p=1013 \text{ mbar}$ et $T = 0^\circ\text{C}$), on définit une atmosphère standard d'épaisseur verticale moyenne de 7.8 Km prise pour référence unité et formée des couches planes et stratifiées par les divers gaz comme l'azote , l'argon , l'eau .

I-3.6. Masse d'air :

La masse d'air optique est définie (par ciel clair) comme la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol, rapportée à la traversée verticale au niveau de la mer. On suppose que cette couche est plane et stratifiée horizontalement et on admet un trajet rectiligne des rayons lumineux, la longueur du trajet est donné

$$OM = OA / \sin h \quad (I.4)$$

On appelle m le rapport OM / OA , soit $1/\sin h$ [4]

A une pression p différente de 1013 mbar et à altitude z (km), on désignera par masse atmosphérique ou nombre d'air m le nombre:

$$m = \frac{p}{1013 \times \sinh} \exp\left(-\frac{z}{7.8}\right). \quad (I.5)$$

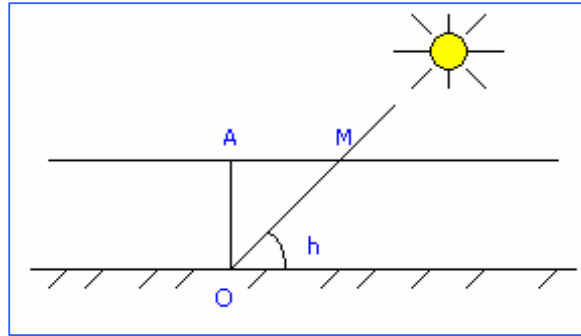


Figure (I-5) : le rayonnement solaire et le nombre d'air masse

I-3.7. Les différents types de rayonnement :

Le soleil fournit une quantité d'énergie énorme, 15.10^{17} kWh/a. le besoin global de la terre (besoins électriques, énergie thermique, transport) est de 30.10^{13} kWh/a. le soleil fournit donc annuellement 5000 fois les besoins énergétiques globaux de la terre. La fraction de rayonnement absorbée varie avec la longueur d'onde.

Le rouge étant plus absorbé que le bleu ou le jaune [4, 7,10]

a) Le rayonnement global :

Le rayonnement global au sol est donc fonction de la composition et de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons lumineux au cours de la journée. Il se décompose en rayonnement direct et rayonnement diffus, et ce sont ces deux rayonnements qui sont exploités par les générateurs solaires

$$G = I \cos\theta + D \quad (I.6)$$

C'est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure ci-dessous.

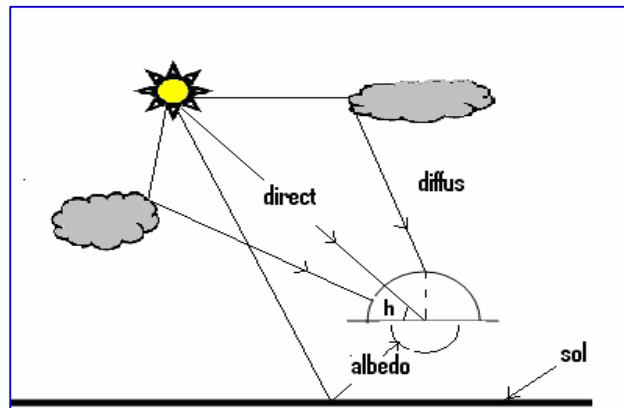


Figure (I-6) : différents composants de rayonnement [3]

b) Le rayonnement direct :

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire incident sur un plan donné et provenant d'un angle solide centré sur le disque solaire.

Soit (θ) l'angle d'incidence du flux sur l'élément plan (ds) figure (suivent).

Le cylindre d'axe parallèle aux flux, la section ($ds \cos \theta$) .la puissance incidente est donc : ($I ds \cos \theta$), est le flux par unité de surface ($I \cos \theta$) [6]

c) Le rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. Les deux rayonnements direct et diffus sont illustrés sur la figure (I-5).

La conversion photovoltaïque utilisant les modules utilise aussi bien le rayonnement direct que le rayonnement diffus. [6]

d) L'albédo :

C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflecteur pour le rayonnement considérée et pour tous les angles d'incidences possible. Par définition, le corps noir possède un albédo nul. [6]

Il y a quelques valeurs de L'albédo selon la surface du sol: [11]

Surfaces du sol	Albédo
Surface d'eau	0,03 à 0,1
Forêt	0,05 à 0,2
Sol cultivé	0,07 à 0,14
Pierres et rochers	0,15 à 0,25
Champs et prairies	0,1 à 0,3
Sol nu	0,15 à 0,4
Neige ancienne	0,5 à 0,7
Neige fraîche	0,8 à 0,95

I.4.5. Les expressions des rayonnements solaires sur un plan quelconque:

I.4.5.1. Rayonnement direct :

Le rayonnement direct reçu dans le plan du capteur est:

$$I_{(\alpha,\gamma)} = I \cdot \cos i$$

Avec I : rayonnement direct normal

i : angle d'incidence : c'est l'angle entre la direction du soleil et la normale au plan,

Cet angle peut être déterminé par la connaissance des cosinus directeurs du rayon incident

\vec{u} et la normale \vec{n} en coordonnées horizontales : [8]

$$\vec{n} \begin{cases} \cos(\gamma) \cdot \sin(\alpha) \\ \cos(\gamma) \cdot \cos(\alpha) \\ \sin(\gamma) \end{cases} \quad \vec{u} \begin{cases} \cos(h) \cdot \sin(a) \\ \cos(h) \cdot \cos(a) \\ \sin(h) \end{cases}$$

Le produit scalaire de et détermine l'angle d'incidence i :

$$\cos i = \vec{n} \cdot \vec{u} = \begin{pmatrix} \cos(\gamma) \cdot \sin(\alpha) \\ \cos(\gamma) \cdot \cos(\alpha) \\ \sin(\gamma) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(h) \cdot \sin(a) \\ \cos(h) \cdot \cos(a) \\ \sin(h) \end{pmatrix} \quad (\text{I.13})$$

$$\cos i = \cos \alpha \cdot \cos \gamma \cdot \sin a \cdot \cosh + \cos \alpha \cdot \cos \gamma \cdot \cos a \cdot \cosh + \sin \gamma \cdot \sinh \quad (\text{I.14})$$

$$\cos i = \cos(\alpha - a) \cos \gamma \cdot \cosh + \sin \gamma \cdot \sinh \quad (\text{I.15})$$

Cette équation peut être écrite d'une autre manière, à l'aide de l'équation des passages d'un système de coordonnées à un autre. On peut écrire l'angle d'incidence en coordonnées horaires. [8]

$$\begin{cases} \sin(h) = \cos(\gamma)\cos(H)\cos(\varphi) + \sin(\delta)\sin(\varphi) \\ \sin(a) = \frac{\cos(\gamma)\sin(H)}{\cos(h)} \end{cases} \quad (\text{I.16})$$

L'expression du rayonnement direct dépend de l'azimut du capteur a , la hauteur du capteur (γ), l'angle d'incidence i , la hauteur du soleil h , et l'angle d'inclinaison β . [8]

• **Soleil à midi** (azimut nul $a=0$) :

a) pour un plan horizontal orienté sud ($\beta = 0 \Rightarrow \gamma = 90^\circ$, et $\alpha = 0$) suivant la figure (I.11.a) ; $I_\alpha = I_0 = I \sin h$

b) pour un plan incliné sur l'horizontal et orienté sud (I.11.b)

$$i = 90^\circ - (h + \alpha)$$

$$I_\alpha = I \cos i = I \sin(h + \alpha)$$

• **Azimut quelconque : $a \neq 0$**

c) pour un plan vertical orienté sud ($\beta = 90^\circ \Rightarrow \gamma = 0^\circ$, et $\alpha = 0^\circ$), la figure (I.11.c)

$$I_\alpha = I \cos h \cos a$$

d) pour un plan incliné d'un angle α sur l'horizontal et orienté sud (I.11.d)

I_α est la résultante de deux composantes projetées sur la normale au plan du capteur.

L'une perpendiculaire à l'horizon : $I \sin h$ l'autre dans le plan de l'horizon, pointant vers le sud : $I \cos h \cos a$.

La somme des projections donne : $I_\alpha = I (\sin h \cos \alpha + \cos h \cos a \sin \alpha)$

e) pour un plan vertical d'orientation quelconque γ dont la normale fait un angle γ avec le plan méridien (I.11.e) ; $\alpha = 90^\circ$ et $I_\alpha = I \cos h \cos (\gamma - a)$

f) pour un plan incliné d'inclinaison quelconque α et d'orientation quelconque γ figure (I.11.f) ; $I_\alpha = I (\sin h \cos \alpha + \cos h \cos (\gamma - a) \sin \alpha)$. [8.4]

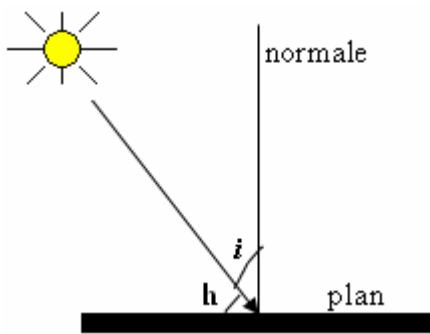


figure (I.7.a)

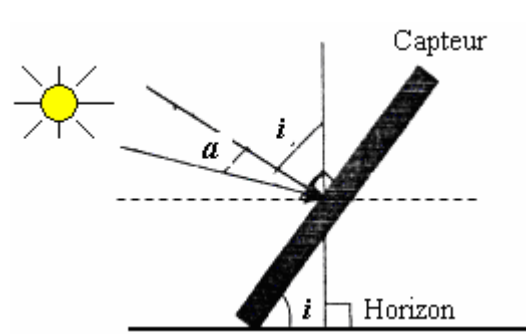


figure (I.7.b)

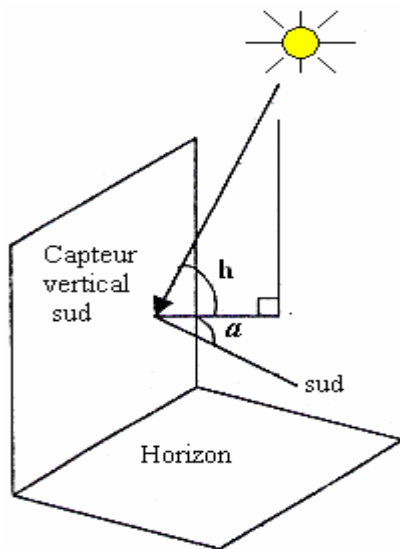


figure (I.7.c)

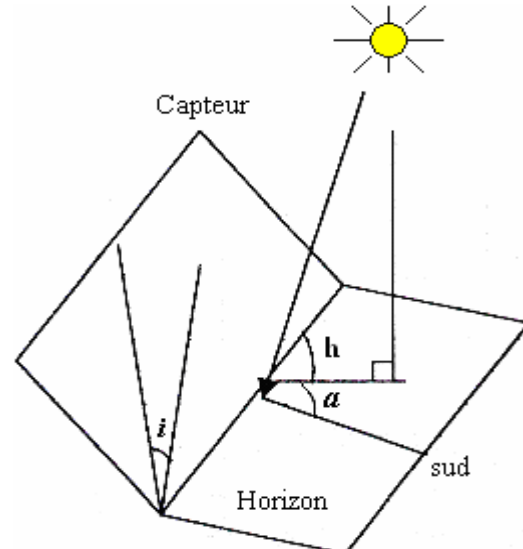


figure (I.7.d)

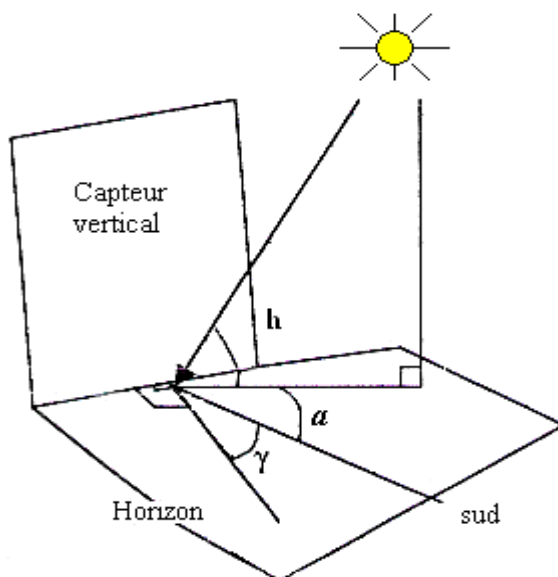


figure (I.7.e)

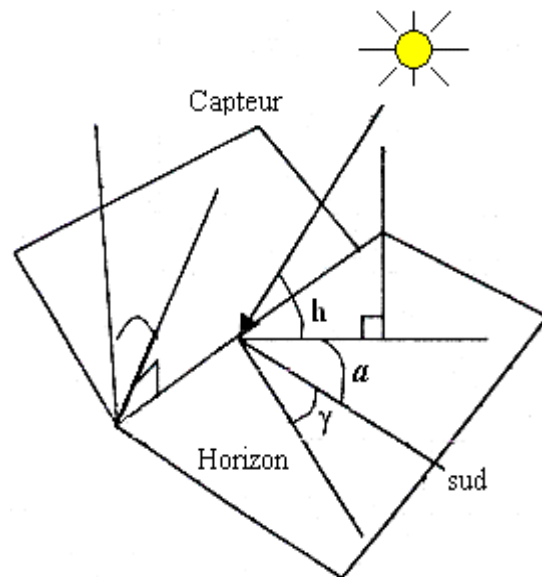


figure (I.7.f)

Fig. (I.7) Mesure le rayonnement sur une surface d'inclinaison quelconque. [4]

I-5. Quelques grandeurs photométriques : [3.12].**a) Le flux**

Le flux lumineux est la valeur instantanée d'un débit de rayonnement. On peut mesurer le flux émis par une source, transporté par un faisceau ou encore reçu par un détecteur. Il peut être mesuré par la puissance qu'il transporte ou par le nombre de photons qu'il transporte par unité de temps, pour une surface S déterminée.

Le flux lumineux s'exprime en Watts (W) [3.12].

b) L'intensité lumineuse:

L'intensité I d'une source de rayonnement est le rapport entre le flux $d\phi_s$ qu'elle émet dans un petit angle solide donné et la valeur de celui-ci. I est en w/sr. [3.12].

c) L'éclairement:

L'éclairement E est la valeur locale du rapport entre le flux reçu par une surface élémentaire d'un récepteur et l'aire de cette surface, soit : $E = \frac{d\phi}{ds}$ (I.19)

E est en W/m². [3.12].

d) L'exposition :

L'exposition H d'une surface réceptrice en un point donné est l'intégrale de l'éclairement en ce point pendant un intervalle de temps donné : $H = \int E dt$ (I.20)

H est donc en J.m². [3.12].

e) La luminance:

Considérons une source de faible surface dS entourant un point O. Soit dI l'intensité de l'élément dans une direction D, et A l'angle formé par d et la normale à l'élément. Alors par

définition $L = \frac{dI}{(dS \cos A)}$ (I.21)

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté des notions importantes sur le gisement solaire comme les Coordonnées terrestres et horaires, le mouvement de la terre autour de soleil. Ensuite nous avons présenté les différents types de rayonnements (direct, diffus, albédo et global) et les expressions mathématiques de chaque rayonnement selon la variation d'inclinaison et d'orientation.

Nous avons terminé par des définitions sur les notions de flux, l'intensité lumineuse, et l'éclairement.

I-INTRODUCTION :

Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

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) [3] 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.

II- Physique de la cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques ou photopiles sont des composants électronique a semi conducteur qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs utilisés en tranches fines ou en dépôts sur un substrat.

II.1-Le semi-conducteur :

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du "bande gap", E_g , en électron-volt (eV).

Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1,0 à 1,8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1,1 eV pour le silicium cristallin (c-Si), et 1,7 eV pour le silicium amorphe (a-Si). [13.14]

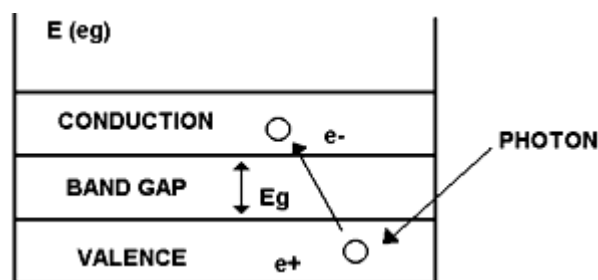


Figure. (II.1) Schéma explicatif du phénomène

II .1-Description de la cellule solaire :

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 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [15]. **La figure (II.2)** représente le principe de fonctionnement.

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium (**La figure II.2**), une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) 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. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (VOC). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (ICC) et dépend fortement du niveau d'éclairement.

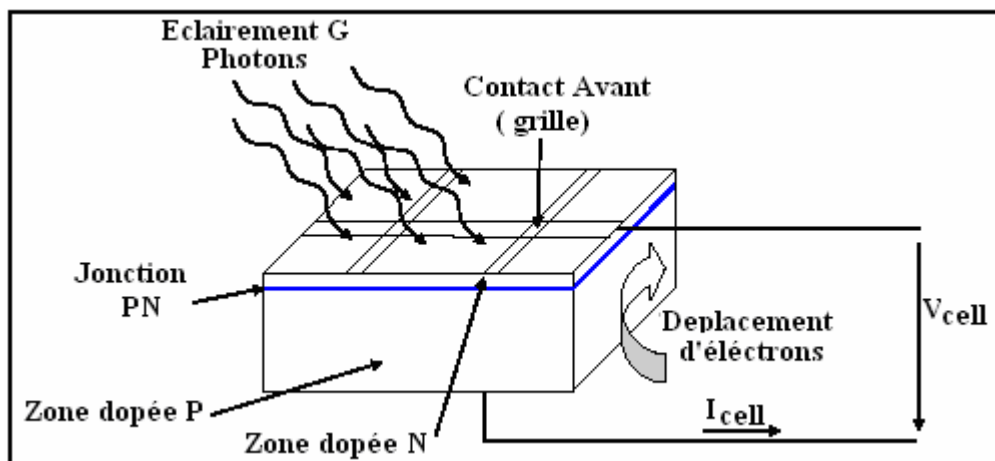


Figure. (II.2) le principe de fonctionnement d'une cellule solaire

II-2.Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électronique équivalent ci-dessous .nous pouvons considérer le cas d'une cellule idéale comprenant d'une source du courant et une diode en parallèle.

La source du courant I_{ph} représente le courant photo- courant (généralisé) et la branche de diode, un courant I_D . [16,17]

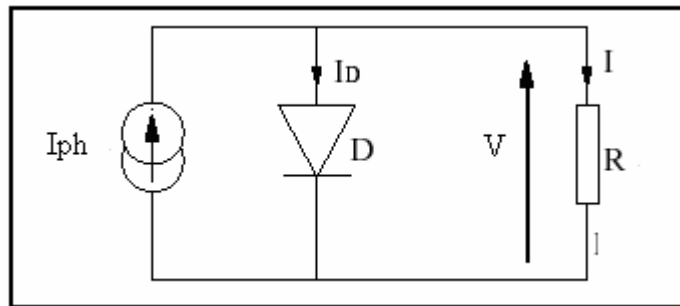


Figure. (II.3) Schéma électrique d'une cellule solaire idéale

Le courant délivré par la cellule photovoltaïque éclairée sur une charge R s'écrit :

$$I = I_{ph} - I_D \tag{II-1}$$

I_{ph} : photo- courant. I_D : courant traversant la diode.

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{V}{U_T}\right) - 1 \right] \tag{II-2}$$

$$\text{Avec } U_T = \frac{k \cdot T}{q} \tag{II-3}$$

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

k : la constante de boltzman.

U_T : tension thermique.

I_s : courant de saturation.

V : tension à la borne de la diode.

T : température absolue (en kelvin).

Si on trace le courant (I) en fonction de la tension (v) on a une soustraction de deux courbes [9, 17, 3]:

I_{ph} : le photo-courant.

I_d : la caractéristique de la diode I (V).

La figure (II-4), représente les différentes courbes [3]:

$$I(V) = I_{ph} - I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V}{U_T}\right) - 1 \right] \tag{II-4}$$

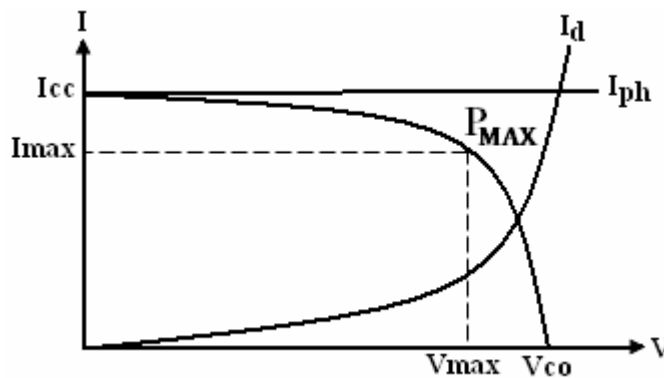


Figure. (II –4) La caractéristique I (V) d’une cellule photovoltaïque

II-3. Modèle réel d’une cellule photovoltaïque :

Dans le cas d’une cellule photovoltaïque réelle, d’autres paramètres tenant compte des effets résistifs, des recombinaisons, des fuites vers les bords, doivent être pris en considération.

Le modèle mathématique du générateur photovoltaïque est basé sur le circuit équivalent. Cette circuit est représenté sur la figure (II.5) par un générateur de courant I_{cc}, une diode et deux résistances R_s et R_{sh}. [3, 4]

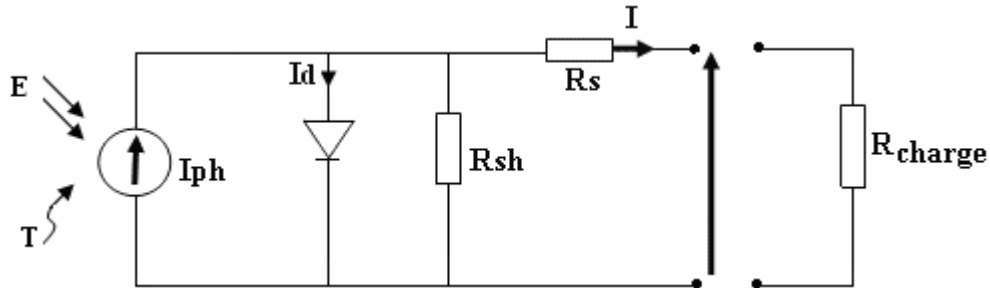


Figure. (II.5) Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque [19]

Selon le schéma équivalent d'une cellule solaire dans La figure (II.5), on a :

$$I = I_{ph} - I_d - \left(\frac{V + I R_s}{R_{sh}} \right) \quad (II-5)$$

$$\Rightarrow I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{(V + R_s I)}{A U_T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (II-6)$$

R_s : résistance série

R_{sh} : résistance shunt

A : Facteur de qualité [19]

II-3-1. Paramètres des cellules photovoltaïques

Les paramètres des cellules photovoltaïques (I_{CC} , VOC , ff et η), extraits des caractéristiques courant tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

a)- 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). 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. [20]

b)-Tension à circuit ouvert, VOC :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie, et décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse. [20]

c)- Puissance débitée :

La puissance fournie par la pile est donnée par le produit $V \cdot I$

$$P = V \times I = V \left(I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right) \right) \quad (II-7)$$

Cette puissance est maximum au point P_m **Figure. (II -4)** défini par $\left(\frac{\partial P}{\partial V} = 0\right)$

$$P_m = V_m \cdot I_m = FF \cdot V_{CO} \cdot I_{CC} \quad (II-8)$$

d)- Facteur de forme, ff :

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). [20]

Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement $PM (I_m, V_m)$ de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{CC} et tension comprise entre 0 et VOC) (**Figure II-4**).

Ce point PM est obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe, quand l'aire du rectangle défini par les axes Ox, Oy et les droites $x = I_m$ et $y = V_m$ passe par un maximum.

Le nom "facteur de forme" dérive de la représentation graphique. Il est défini par la relation suivante:

$$ff = \frac{P_{max}}{V_{CO} \cdot I_{CC}} \quad (II-9)$$

Il est égal au rapport de la surface du rectangle P_{max} défini sur celle du rectangle dont les cotés mesurent VOC et ICC . Plus ce paramètre est élevé, meilleure est l'efficacité de conversion. En dehors de ce point de fonctionnement PM particulier, la diminution du courant par recombinaison intervient à des points de fonctionnement ayant V_x supérieur à VM et des pertes par chauffage (effet joule) des résistances séries apparaissent dans le cas $I > IM$ [20]

e)-Le rendement η :

Le rendement, η des cellules PV 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, P_{in} .

$$\eta_c = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{P_{solaire}} \quad (II-10)$$

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs, des recombinaisons, des fuites vers les bords, doivent être pris en considération.

Le schéma équivalent est représenté sur (*la figure II.5*) par un générateur de courant I_{cc} , une diode et deux résistances R_s et R_{sh} .

II-3-2- Méthode de détermination de la résistance série :

Plusieurs méthodes d'évaluation de R_s ont été établies. La plus simple est la méthode graphique, qui utilise deux courbes I-V pour deux illuminations différentes, a été suggérée pour la première fois en 1960 par Swanson [21.22]

Cette méthode consiste à choisir une valeur arbitraire de ΔI à partir du courant de court-circuit. Il est préférable de choisir ΔI de telle façon que l'on obtienne un point sur la partie verticale de la courbe I-V. Le même ΔI est choisi sur une deuxième courbe I-V correspondant à une autre illumination [11].

Une illustration est présentée sur la (*figure II .6*).

Nous pouvons écrire :

$$I = -I_L + I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{nKT}\right) - 1 \right] + \frac{V + R_s I}{R_{SH}} \quad (II-11)$$

Le dernier terme est négligé, car R_{SH} est assez grand devant R_s . De même que nous pouvons faire la l'approximation suivante :

$$I_L \cong I_{SC} \quad (II-12)$$

I_L : photo courant.

I_{SC} : courant de court-circuit.

Appliquons l'équation (II.6) à la (figure II-5) nous obtenons alors :

$$I_1 = I_{SC_1} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_1 + R_s I_1)}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-13})$$

$$I_2 = I_{SC_2} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_2 + R_s I_2)}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-14})$$

Or $I_1 - I_{SC_1} = -\Delta I$ et $I_2 - I_{SC_2} = -\Delta I$ (II-15), (II-16)

Ce qui fait :

$$\exp\left(\frac{q(V_1 + R_s I_1)}{nKT}\right) = \exp\left(\frac{q(V_2 + R_s I_2)}{nKT}\right) \quad (\text{II-17})$$

D'où :

$$\frac{V_1 + R_s I_1}{nKT} = \frac{V_2 + R_s I_2}{nKT} \quad (\text{II-18})$$

Soit

$$R_s = \frac{V_2 - V_1}{I_1 - I_2} \quad (\text{II-19})$$

Or

$$I_1 - I_2 = I_{SC_1} - I_{SC_2} \quad (\text{II-20})$$

Nous obtenons donc :

$$R_s = \frac{V_2 - V_1}{I_{SC_1} - I_{SC_2}} \quad (\text{II-21})$$

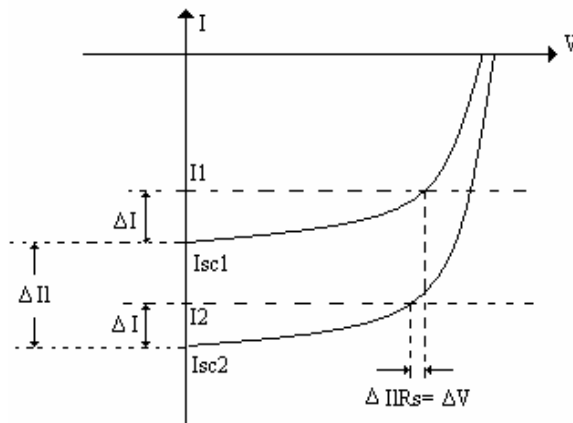


Figure (II-6) : Détermination graphique de la résistance série

III-2-3 -Détermination de la résistance shunt :

Différentes méthodes de détermination de la résistance shunt ont été proposées par des chercheurs. Nous retenons la méthode la plus simple qui consiste à évaluer R_{SH} , à partir de la pente de la caractéristique I-(V), au point de court-circuit [21]

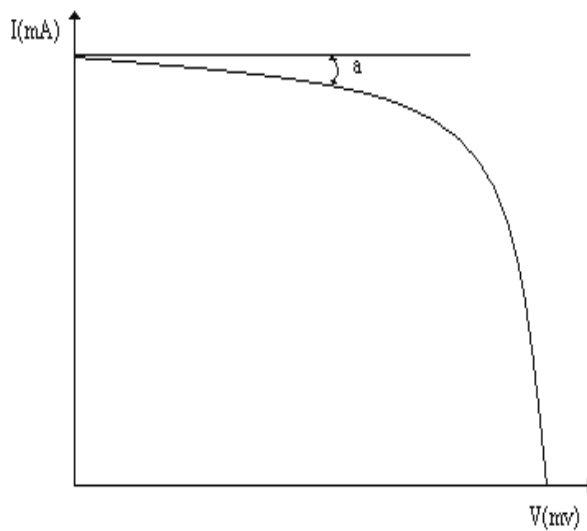


Figure (II-7) : Détermination graphique de la résistance shunt

Dans la région de la courbe I-V où la cellule se comporte comme un générateur à courant constant, l'équation (16) s'écrit alors :

$$I = I_L - \frac{V + R_s I}{R_{SH}} \quad (\text{II-22})$$

$$I = \frac{I_L - \frac{V}{R_{SH}}}{1 + \frac{R_s}{R_{SH}}} \quad (\text{II-23})$$

En différenciant cette équation, on obtient :

$$\frac{dI}{dV} = - \frac{1}{R_s + R_{SH}} \quad (\text{II-24})$$

Généralement $R_s \ll R_{SH}$, écrire :

$$\frac{dI}{dV} = - \frac{1}{R_{SH}} \quad (\text{II-25})$$

Ainsi :

$$\text{tg } a = G_{SH} \quad (\text{II-26})$$

Où G_{SH} représente la conductance parallèle, donc :

$$R_{SH} = \frac{1}{\text{tg } a} \quad (\text{II-27})$$

IV- L'équation caractéristique de la cellule.

Le circuit équivalent d'une cellule solaire est représenté par la **figure II.5**, le photocourant est représenté par un générateur de courant I_{ph} et il est de sens opposé au courant de polarisation directe de la diode.

La caractéristique courant-tension d'une cellule solaire se met sous la forme mathématique de l'équation (II-8) qui peut être reformulée sous la forme : [5, 17, 21]

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{(V + R_s I)}{AU_T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_{Sh}}\right) \quad (\text{II-28})$$

I_{ph} : le photo-courant.

U_T : tension thermique.

I_s : courant de saturation.

V : tension à la borne de la diode.

T : température absolue (en kelvin).

R_s : résistance série

R_{sh} : résistance shunt

A : Facteur de qualité

Les figures (II.8) représentent les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un module pour un éclairage et une température donnée.

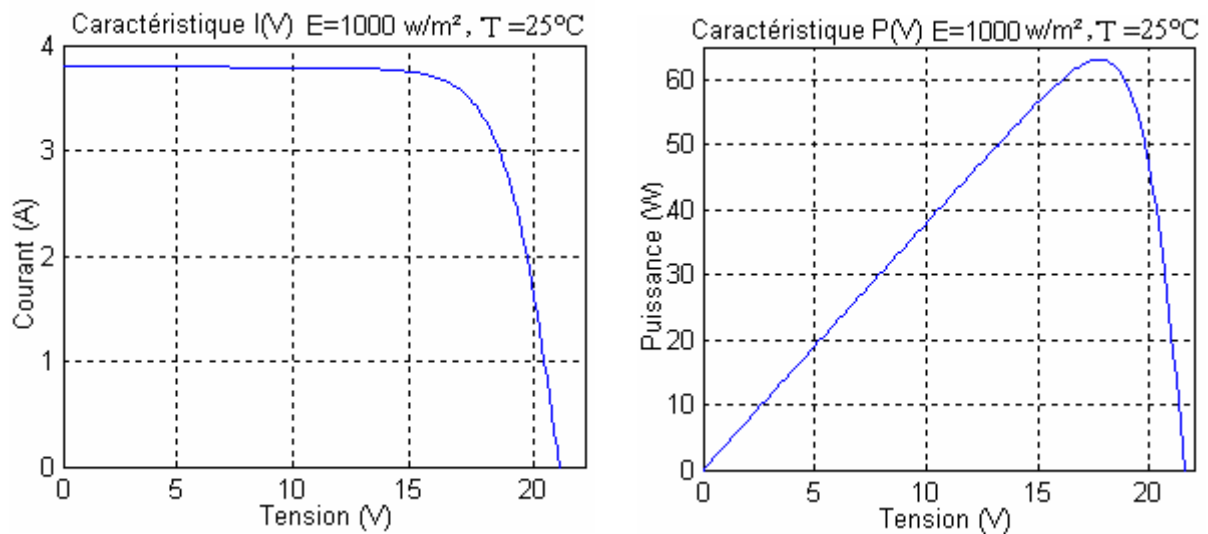


Fig. (II.8) Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'un module solaire

IV-2- Les zones de Caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque:

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairage et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement ; seule la courbe $I = f(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (II.9) représente trois zones essentielles : [22.3]

a) La zone (1) : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

b) La zone (2) : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

c) La zone (3): qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

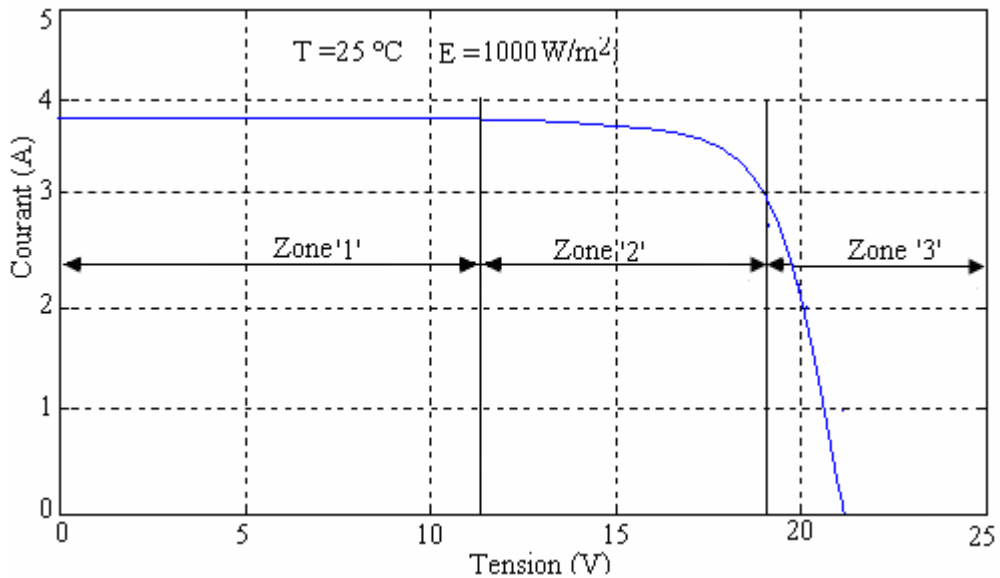


Figure. (II.9) Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque

IV-3- Les paramètres qui influent sur la caractéristique $I = f(V)$:

a) Influence de l'éclairement

La puissance délivrée par un générateur PV dépend de l'irradiation quelle reçoit.[3,4]

La figure (II-10) représente la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) solaire en fonction de l'éclairement, à une température.

On remarque que le courant est proportionnel à l'intensité lumineuse et dépend de la surface éclairée, contrairement à la tension qui diminue légèrement avec le flux lumineuse

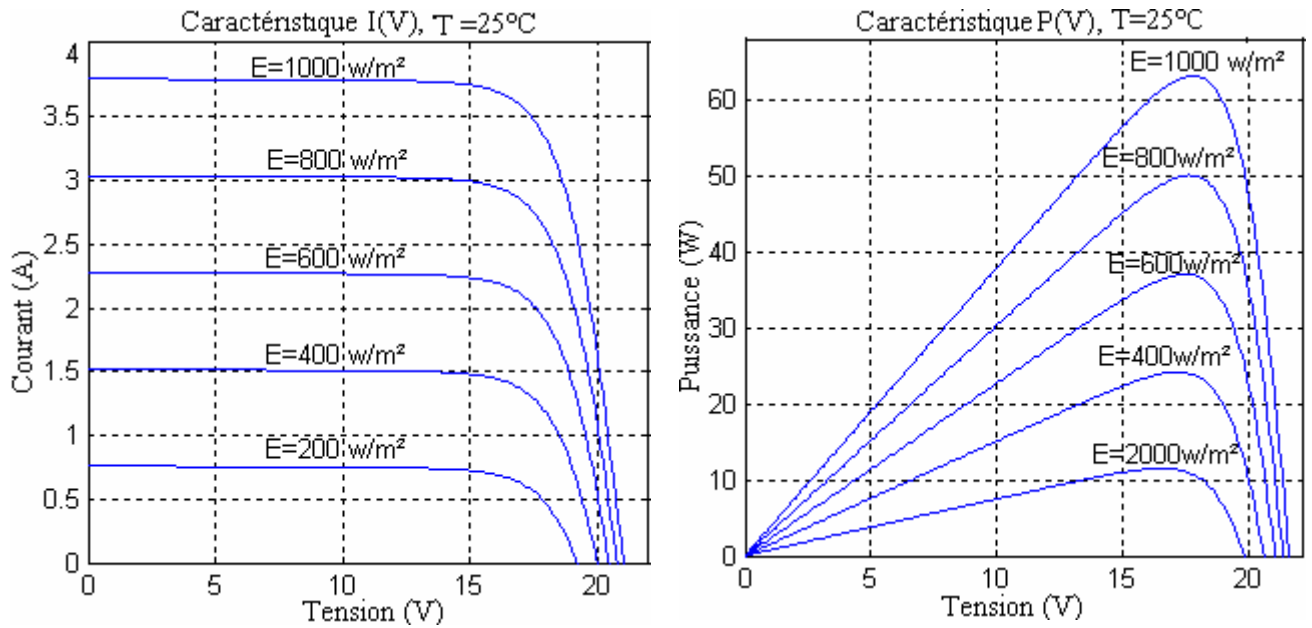


Figure. (II.10) Influence de l'éclairement sur la caractéristique I (V) et P(V)

b) Influence de la température :

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi conducteur sont très sensibles à la température. [23]

Sur une cellule :

$$I(V) = I_{ph} - I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V}{U_T}\right) - 1 \right] \quad (II-29)$$

$$U_T = \frac{k \cdot T}{q} \quad (II-30)$$

La figure (II-11) représente la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) solaire en fonction de la température, à un éclairement et constante.

On remarque que L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale.

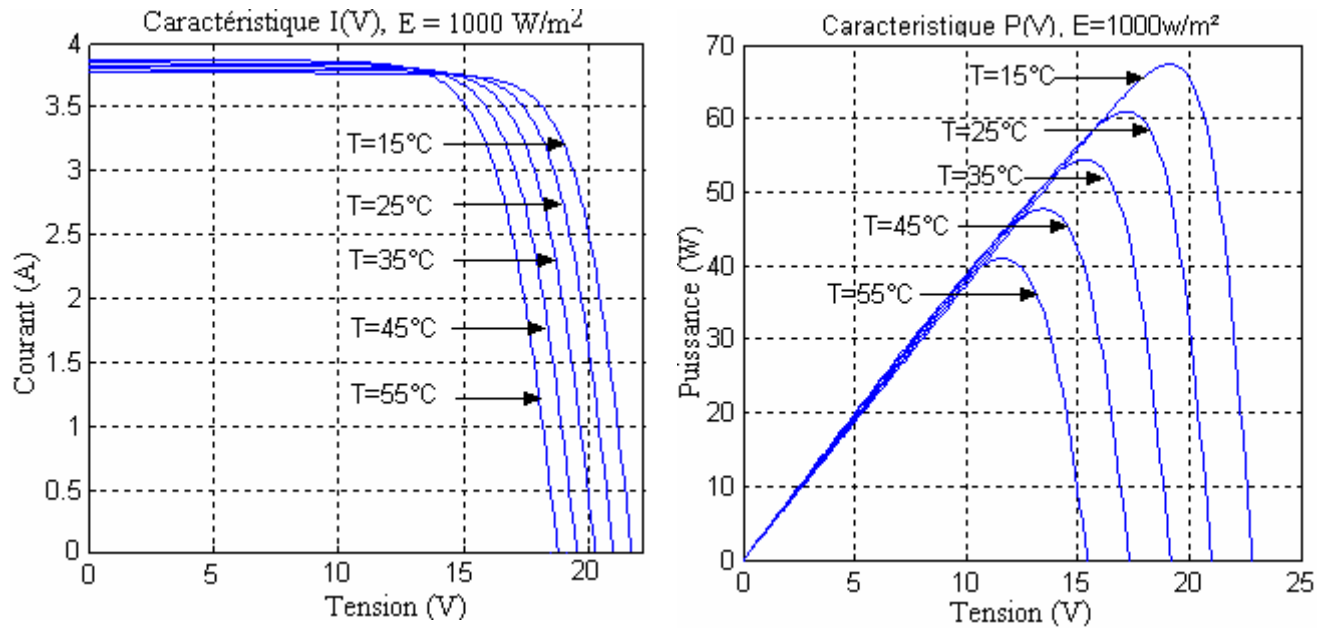


Figure. (II.11) Influence de la température sur la caractéristique I (V) et P(V)

c) Influence de la résistance série :

La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. [23]

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone de la photodiode se comporte comme un générateur de tension,[23] et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court circuit. Figure (II-12)

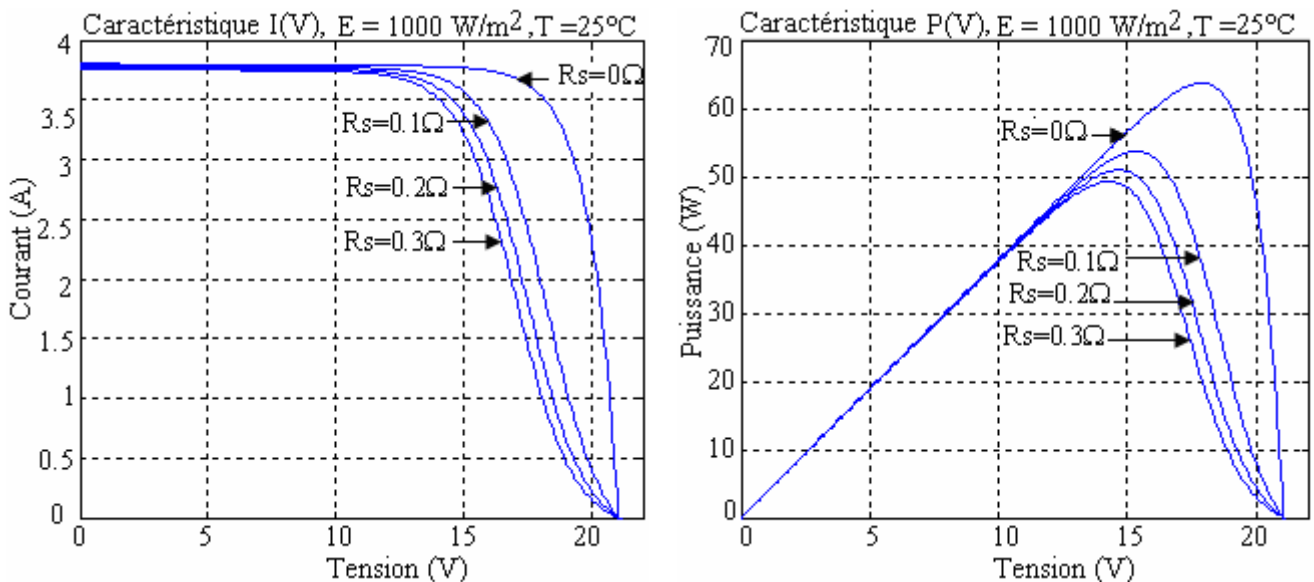


Fig. (II.12) L'influence de la résistance série R_s sur la caractéristique I (V) et P(V)

d) Influence de la résistance shunt :

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes opposées positives d'une photopile.(micro court-circuit) [22 ,25]

En générale, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération du courant. [8,25]

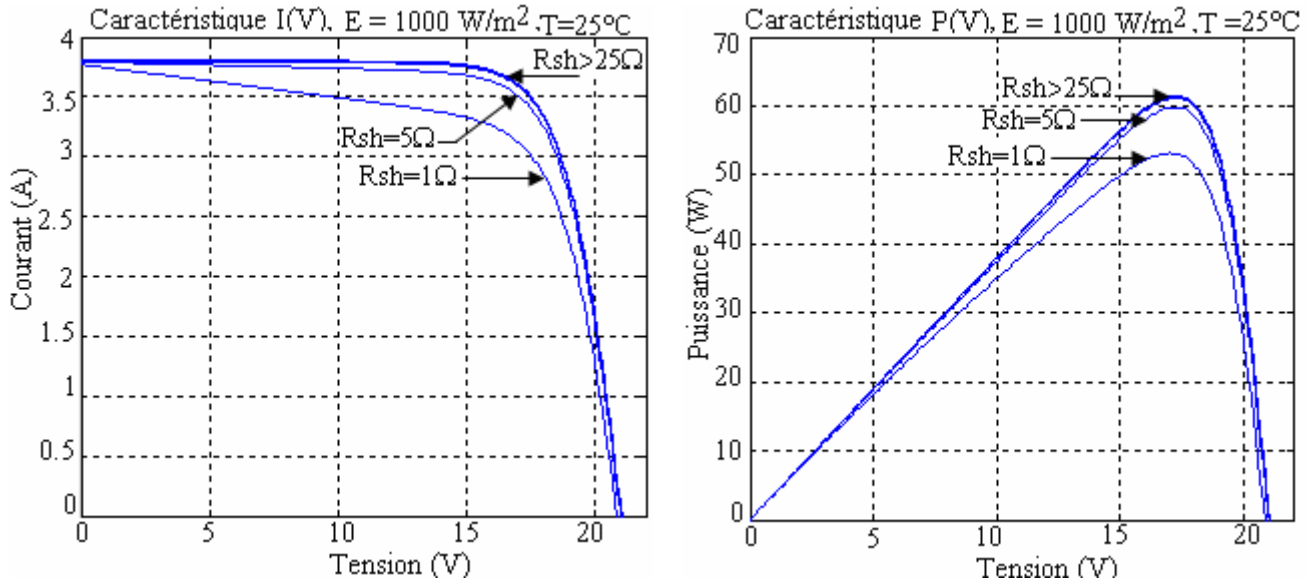


Figure.(II.13) : L'influence de la résistance shunt Rsh sur la caractéristique I (V) et P(V)

e) Influence de facteur de qualité :

L'augmentation du facteur de qualité de la diode influe inversement sur le point de puissance maximale et cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement. [24,14]

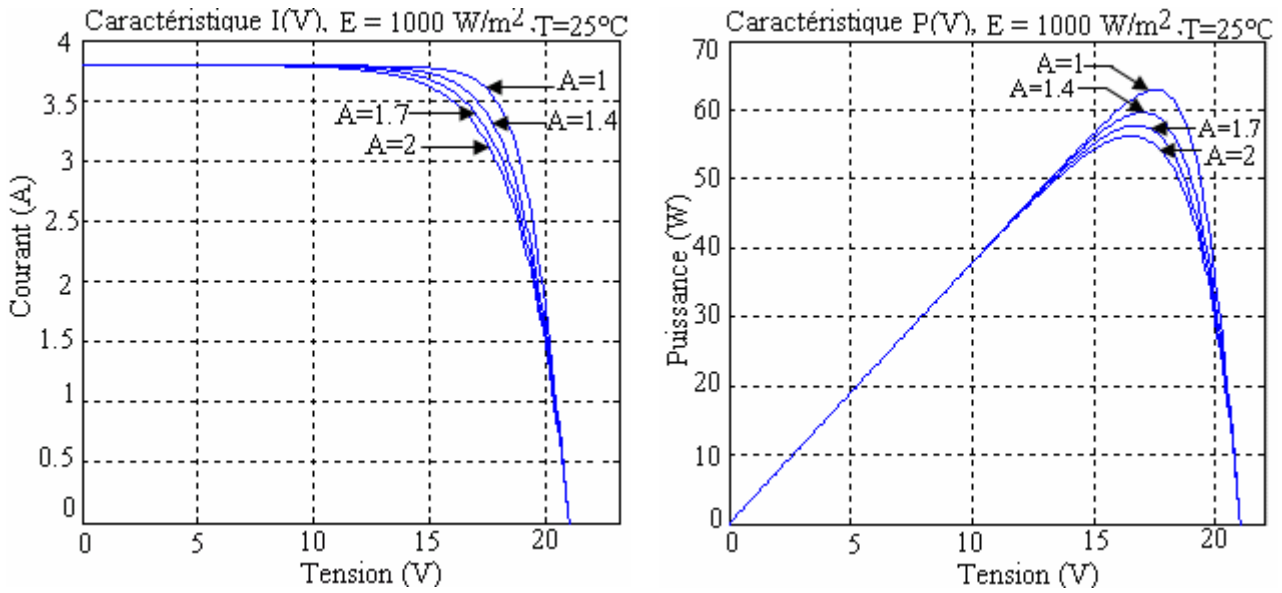


Figure. (II.14) L'influence de facteur de qualité A sur la caractéristique I (V) et P(V)

V-1- Les modules photovoltaïques:

Les modules photovoltaïques sont des généralement constitués de cellules connectées en série ou parallèle pour obtenir des tensions compatibles avec les charges à alimenter.

Ce module est protégé en face avant par une plaque de verre et en face arrière par un autre matériau (verre ou résine) et installé sur un cadre en aluminium anodisé

a) Mise en série :

L'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. [14,26 ,27]

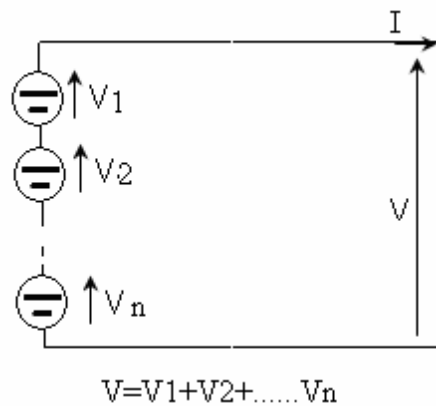


Figure. (II.15) Groupement des cellules en série

La caractéristique d'un groupement de n_s modules solaires en série est représentée par la figure suivante :

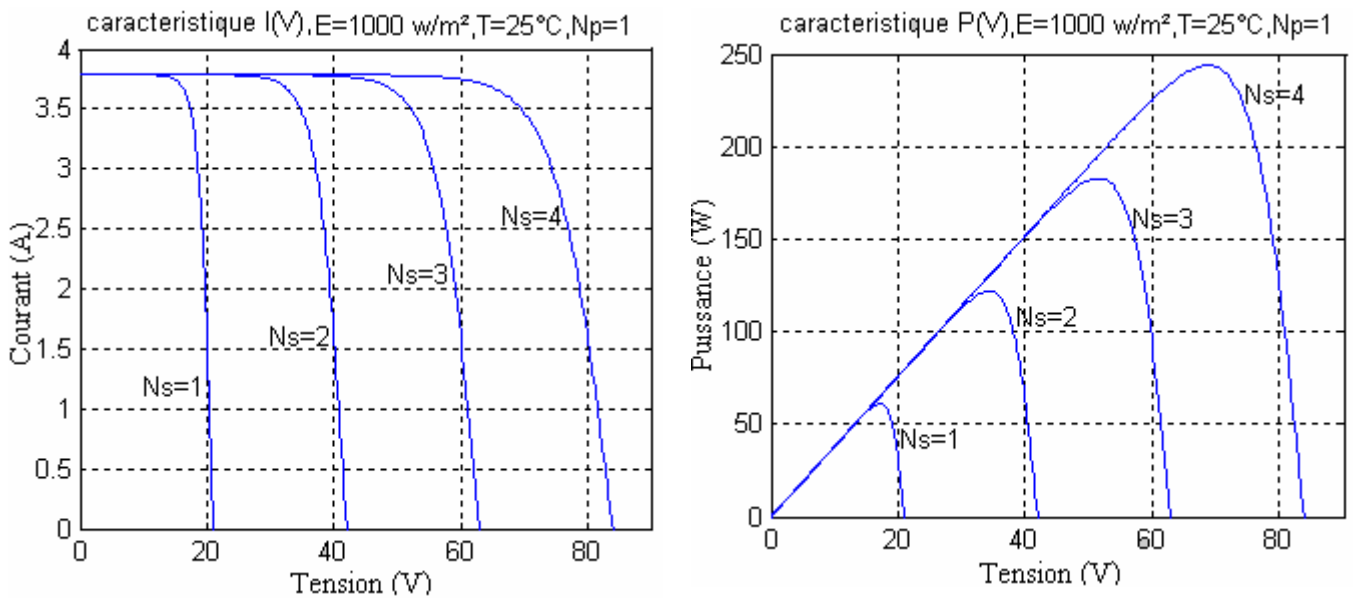


Figure. (II.16) Caractéristique de nombre des modules en série

b) Mise en parallèle :

L'association en parallèle des photopiles délivre une courant égale à la somme des courants individuelles et une tension égale à celui d'une seule cellule. [14,26 ,27]

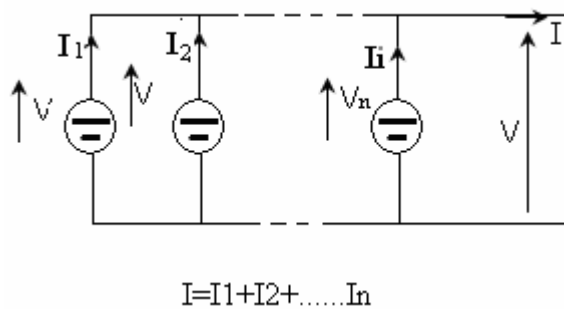


Figure. (II.17) Groupement des cellules en parallèle.

La caractéristique d'un groupement de N_p modules solaires en parallèle est représentée par la figure suivante :

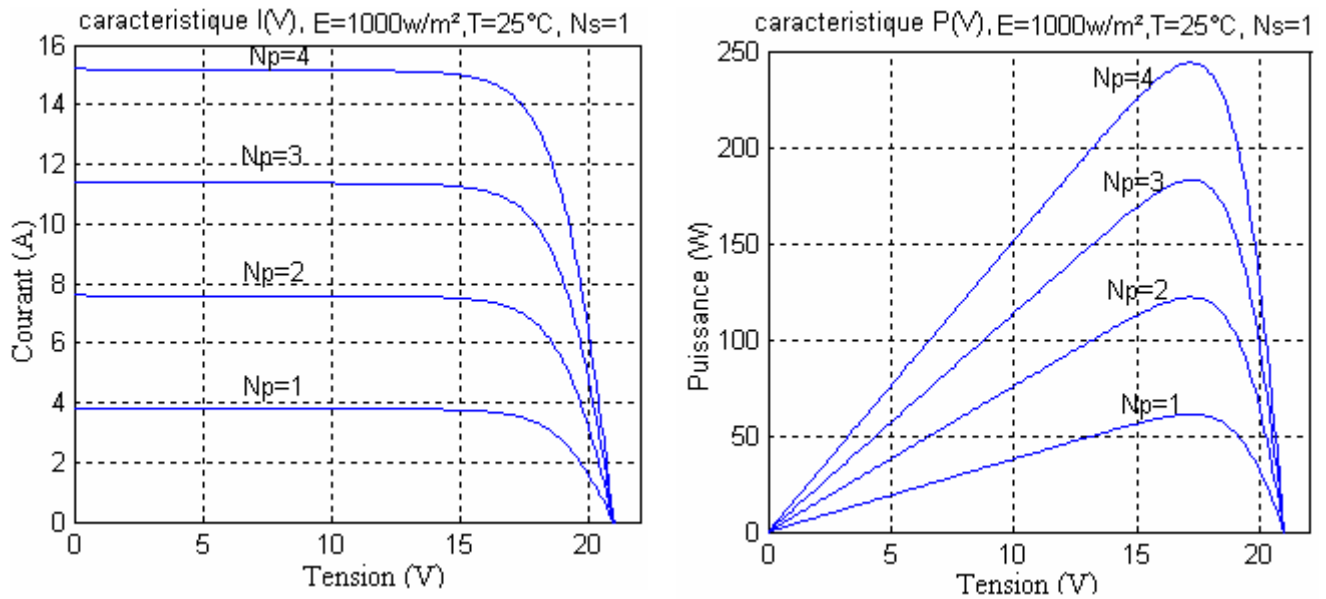


Figure. (II.18) Caractéristique de nombre des modules en parallèles

c) Mise en série parallèle :

Le câblage série –parallèle est utilisé pour obtenir un générateur aux caractéristiques souhaitées.

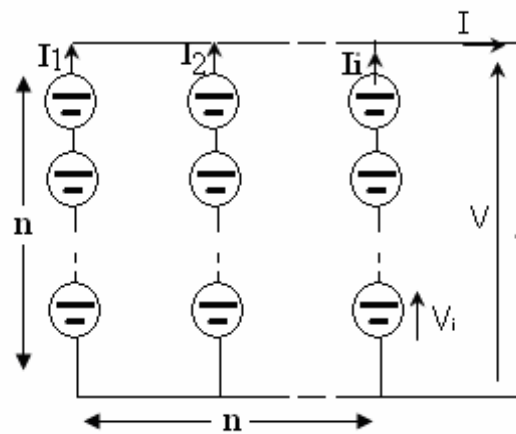


Figure. (II.19) Groupement des cellules mixte.

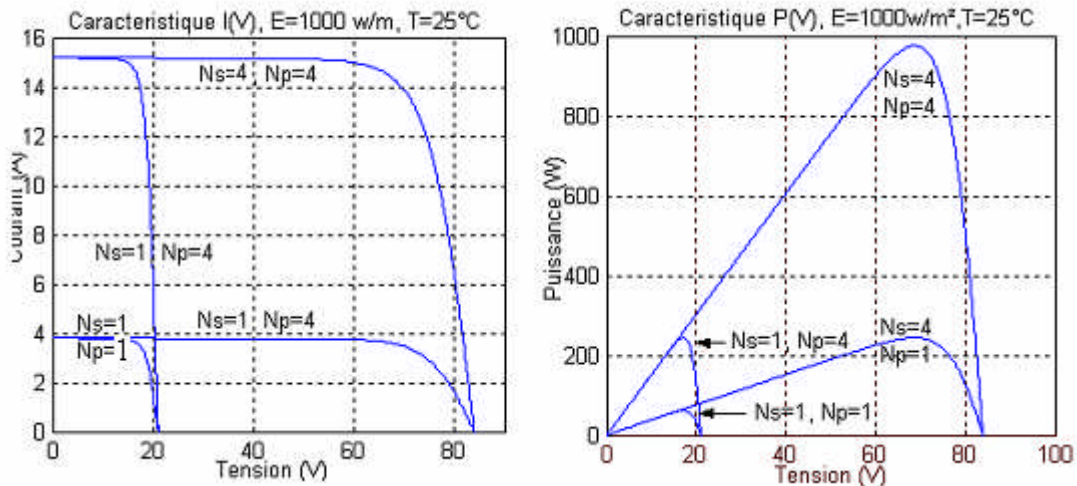


Figure. (II.20) Caractéristique de nombre des modules en série et en parallèle

VI Présentation des différents types de cellules photovoltaïques :

La production mondiale de cellules photovoltaïques est totalement dominée par la filière silicium. La figure (II.21) présente la répartition des cellules disponibles sur le marché selon leur filière de production.

Si la production photovoltaïque est composée à 90 % de cellules photovoltaïques à base de silicium, la part des autres technologies comme les cellules à base de diséléniure de cuivre et d'indium (CIS), de tellure de cadmium (CdTe) ou de couches minces de Silicium est en augmentation constante. . [28]

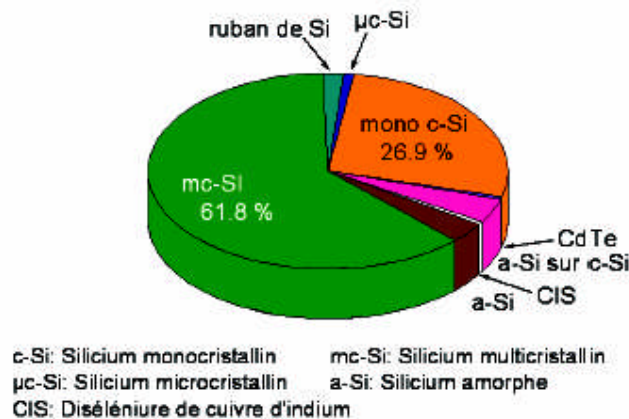


Figure. (II.21) : Répartition de la production photovoltaïque mondial des différents filières

Les films minces qu'ils soient amorphes ou microcristallins, présentent des avantages certains dans la course à la production de modules solaires à grande échelle. On peut relever deux principales filières de photopiles

a)-Les photopiles à couche actives épaisses :

Aujourd'hui les rendements des cellules photovoltaïques commerciales constituées de silicium polycristallin varient de 13 à 15 % alors que le rendement maximal Théorique d'une cellule photovoltaïque en silicium avec une seule bande interdite est évalué à 31% pour un spectre solaire incident AM1,5 de 1000 W/m² [4].

Les pertes entre la valeur théorique et la valeur expérimentale proviennent essentiellement de la conversion de l'excès d'énergie incidente en chaleur et des pertes par transferts de charges aux interfaces de chaque couche.

Longtemps le coût de purification du silicium a été un frein à la commercialisation grand public de cellules photovoltaïques. Le taux d'impuretés présent dans le silicium doit être le plus faible possible pour avoir un rendement le plus proche possible de 31% ce qui impose un coût de raffinement du silicium élevé. Pour faire face à cette contrainte divers programmes de recherches ont été consacrés à la réduction des coûts de fabrication des cellules photovoltaïques. En se trouvent les caractéristiques des meilleures photopiles au silicium, à 25°, sous un éclairement solaire de 1KW/m².

	Superficie cm ²	V _{co} mv	J _{cc} mA/cm ²	FF %	η %	Entreprise
Monocristallin						
9/94	4	709	40.9	82.7	24	UNSW Spire
10/85	4.02	634	36.3	81.6	18.8	
Polycristallin						
12/95	1.00	636	36.5	80.4	18.6	Georgia Sharp
3/93	100.00	610	36.4	77.7	17.2	

Tab.2.Caractéristique des, meilleurs photopile épaisses»é au Si

b)-Cellules en couches minces :

D'autres filières sont en cours de développement dans le secteur photovoltaïque comme les cellules dites de seconde génération composées de couches minces pour des raisons économiques (utilisation d'une plus faible quantité de matériau). Les matériaux photo actifs les plus utilisés en couche minces sont le silicium amorphe (a-Si), le diséléniure de cuivre indium (CIS), le tellure de cadmium (CdTe) et le (GaAs). L'avantage principal des cellules photovoltaïques composées de couches minces de matériaux est le faible coût de production par rapport à celui des cellules composées de silicium épais. . [4]

- ✓ La structure (PiN) type d'une cellule photovoltaïque au silicium amorphe se manifeste clairement au niveau de la caractéristique électrique $I(v)$ [4]
- ✓ Le semi-conducteur monocristallin le plus utilisé est le GaAs, ou assez souvent, les solutions solides (Ga,Al)As. c'est le matériau le plus performant au point de vue rendement de conversion (supérieur à 20), ce qui le rend très intéressant dans les applications spatiales, quoique sa densité soit 203 fois supérieure à celle du silicium. Actuellement, les meilleurs rendements sont atteints avec la jonction (Ga,In)P/GaAs en structure tandem (tab).
- ✓ Les matériaux polycristallins les plus prometteurs en couches minces jusqu'à présent sont le CIGS et le CdTe, en hétérojonction avec le (Zn, Cd)S. Le gap du CdTe est de 1.45 eV et est proche de la valeur optimale théorique pour les photopiles terrestres, mais celui du CIGS peut être ajusté entre de 1.02 eV de CIS et de 1.68 eV de CGS. [4,29]

	Superficie cm ²	Uco mv	Jcc mA/cm ²	FF %	η %	Entreprise
Ga.In P/ GaAs						
4/94	4	2488	14.22	85.6	30.3	Japan Energy NREL
6/93	0.250	2385	13.99	88.5	29.5	
CdS/CIGS/ Mo						
1/99	0.44	678	35.07	78.89	18.8	NREL Matsushita NREL Solarex
10/99	1	--	--	--	18.5	
3/96	0.41	674	34	77.3	17.7	
11/94	1.03	594	32.8	73.8	14.4	
ZnSe/CIGS						
9/99	--	488	36.3	62	11.0	Absorbeur .Siemens Emetteur :MOCVD H MI(Config ;substrate)
CdTe						
6/92	1.047	843	25.09	74.5	15.8	Univ .South florida Solar cells .INC
4/95	1.115	828	20.90	74.6	12.9	

Tab.2.Caractéristique des, meilleures photopiles au GAs au CIGS et au CdTe

c) les cellules organiques :

Une cellule photovoltaïque organique est composée d'une couche active organique entre deux électrodes. (Figure 21) représente un schéma simplifié d'une telle cellule. [28 ,30]

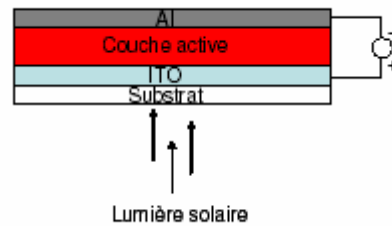


Figure. (II.21) :schéma simplifié d'une cellule organique

Une électrode transparente, généralement d'ITO (anode, oxyde d'indium et d'étain $(\text{In}_2\text{O}_3)_90(\text{SnO}_2)_{10}$), est déposée sur un substrat transparent comme du verre ou du plastique.

Pour la cathode, de l'aluminium est déposé par évaporation sur la couche active.

Cette couche active organique est composée de deux matériaux, l'un transporteur de trous, l'autre transporteur d'électrons.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit la nécessité d'étudier la caractéristique du modèle de la photopile. Nous avons présenté les différentes zones de fonctionnement, l'influence des différents paramètres sur la caractéristique $I(V)$, $P(V)$. Ainsi la synthèse d'assemblage des panneaux soit en série, parallèle ou mixte.

Enfin nous avons présentée des différents types de cellules photovoltaïques

III .1.Introduction :

L'utilisation de la concentration de rayonnement solaire revient à utiliser moins de matériaux semi conducteurs pour une même puissance électrique résultante et l'on peut espérer diminuer ainsi le prix du watt produit.

En réalité, le raisonnement n'est pas aussi simple qu'il y paraît, car un système à concentration nécessite toute une infrastructure, réalisée avec des matériaux à coefficients d'absorption élevés.

III .2-Absorption optique d'une photopile solaire :

Les performances d'une photopile solaire peuvent être caractérisée par la capacité à absorber les photons de différentes énergies du spectre solaire ,la plupart des matériaux semi-conducteur ayant un indice de réfraction supérieur à 3 ,il présentent un coefficient de réflexion élevé dans le visible, il convient donc de les recouvrir d'une couche antireflet pour ramener le pourcentage de la lumière réfléchi à une valeur raisonnable .

Le tableau suivant donne les constantes optiques de quelques matériaux à la longueur d'onde $0.59 \mu\text{m}$ [4]

Matériau	ζ_r	n	k	r	$\alpha \text{ (cm}^{-1}\text{)}$
Silicium cristallin	11.9	3 ,97	0.03	0.36	$4 ,5 \cdot 10^3$
Silicium amorphe	19	4.36	0.69	0.40	$2 ,4 \cdot 10^4$
AsGa	12.9	3.94	0.24	0 .36	$5,4 \cdot 10^4$
Germanium	16	5.75	1.63	0.52	
Cds	9	2.4			0 ,01
CdTe	7.2	2.87	0.26	0.24	$3,1 \cdot 10^4$
Cu In Se2					$1 ,2 \cdot 10^5$
SiO ₂	3 ,8	1 .55	0.04	0.04	50
SnO ₂		1.79	0.05	0.08	500

Tableau III .1 : les constantes optiques de quelques matériaux

III-2.1.Coefficient d'absorption de divers semi-conducteurs :

La figure suivante montre les spectres d'absorption $\alpha(\lambda)$ ainsi que la longueur d'onde de coupure correspondant à l'énergie de bande interdite .pour différents matériaux [4]

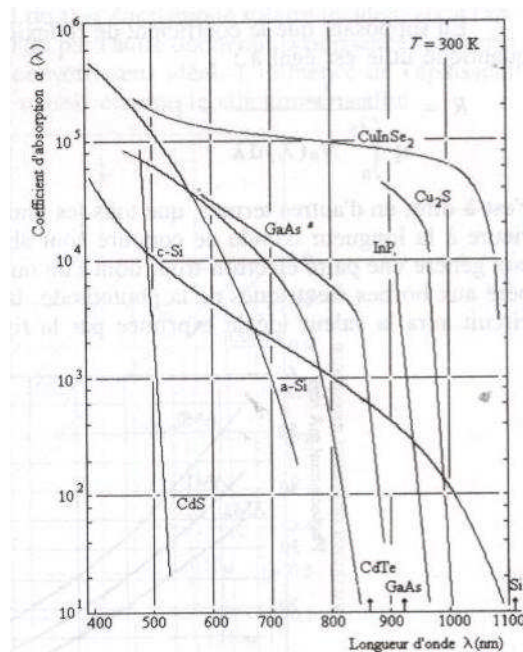


Figure (III .1) : coefficient d'absorption optique de divers semi-conducteurs

Le taux de génération est donné par la relation :

$$G_n(x) = G_p(x) = -\frac{\partial N}{\partial x} = \alpha(\lambda)N_0 \exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (\text{III.1})$$

Deux paramètres importants gouvernent l'absorption : le seuil et la pente. Cette dernière permet de définir une longueur d'absorption :

$$d_\lambda = \frac{1}{\alpha(\lambda)} \quad (\text{III.2})$$

Qui caractérise l'épaisseur de matière nécessaire pour diviser l'intensité du rayonnement.

La plupart des matériaux cristallins (CIS, Cd Te, GaAs) ont un front d'absorption raide et des longueurs d'absorption inférieures au (μm).il en est de même du silicium amorphe dont le front d'absorption, très raide, dépend de la teneur en hydrogène. [4]

Il s'ensuit que nous aurons à faire à trois classes de matériaux :

- Les matériaux massifs à gap indirect tels que le silicium cristallin
- Les matériaux à gap direct en couches minces tels que le CdTe
- Les alliages dont le gap peut varier continument avec la composition tels que le $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$.

III-3. Les concentrateur et les système associes :

La concentration du rayonnement solaire a été très largement étudiée et utilisé pour la conversion thermique .les développements concernant la concentration sur photopiles seront seule abordés, et deux point importants sont a considérer.

L'uniformité de l'éclairement, et la répartition spectrale de cet éclairement dans le plan récepteur .les deux causes de ces non uniformités son la source solaire et le système de concentration. [3,14,31]

III-4.La concentration du rayonnement solaire :

Notre étude doit s'étendre à l'utilisation de techniques pour concentrer le rayonnement solaire par un dispositif adéquat, miroir ou lentille qu' l'on sait réaliser de façon économique En particulier ,on réalise des lentilles Fernel ,efficaces et peu couteuses .

III -4 .1- Différents types de capteurs à concentration :

Un capteur à concentration est un capteur solaire comportant un système optique (réflecteur, lentilles, ...) destiné à concentrer sur l'absorbeur le rayonnement reçu (d'où le nom de capteur à concentration). Naturellement ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil. En utilisant des réflecteurs afin de concentrer les rayons du soleil sur l'absorbeur d'un capteur solaire, cela permet de diminuer grandement la taille de l'absorbeur. Un autre avantage de ce système est que les réflecteurs sont sensiblement moins coûteux, par unité de surface, que les capteurs.

La concentration solaire en photovoltaïque utilise en général la réflexion ou la réfraction des rayons lumineux ou bien une combinaison des deux. [14,31,32]

III -4 .2.Concentration à réflexion :

Parmi les concentrations utilisant la réflexion de la lumière ces concentrations présentent certains inconvénients

- Les cellules sont placées au dessus de la surface réfléchissante et donnent une ombre sur cette surface
- Il est difficile de concevoir une enceinte de protection de l'ensemble contre les agressions extérieures .il est nécessaire d'utiliser un refroidissement actif, c'est à dire refroidir avec un fluide.

Seules les photopiles peuvent être facilement encapsulées mais d'autre part, les concentrateurs permettent des puissances électriques élevées pour une faible quantité de matériaux semi conducteurs [32]

Il existe deux types de capteurs à concentration réflexion :

a) Réflecteur cylindro-parabolique :

Un capteur cylindro-parabolique est un capteur à concentration à foyer linéaire utilisant un réflecteur cylindrique de section parabolique.



Figure (III.2) : Systèmes à réflecteur cylindro –parabolique

b) Réflecteur parabolique :

Un capteur parabolique est un capteur à concentration utilisant un réflecteur forme de parabole de révolution et qui concentre les rayons solaires dans un foyer ponctuel.

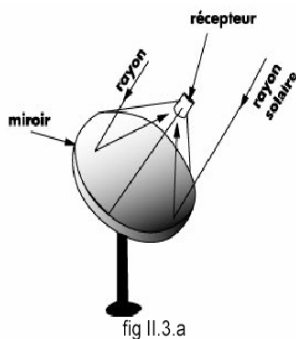


fig II.3.a



Figure(III.3): Systèmes à réflecteur -parabolique

c) Capteurs solaires fixes à concentration :

Les capteurs fixes à concentration utilisent des réflecteurs à composés paraboliques ainsi que des réflecteurs plans afin d'orienter l'énergie solaire vers un absorbeur d'accompagnement ou une fente à travers un important angle d'admission. L'important angle d'admission pour ces réflecteurs élimine la nécessité d'avoir un système de pointeur solaire. Ce type de capteur comprend des capteurs plans à réflecteurs cylindro-paraboliques, des capteurs plans, avec des réflecteurs paraboliques de surpression,

III -4 .3. Système a réfraction ou a lentille de Fresnel :

Ce sont les plus employés des systèmes de concentration des piles solaires la figure (III .4) représente en coupe une lentille de Fresnel ainsi que le trajet des rayons lumineux,

L'utilisation de la lentille de Fresnel pour la concentration présente certains avantages

- Une fermeture hermétique de la cellule et de la partie optique peut être réalisée dans un bac commun dont la lentille est la face supérieure
- La partie gravée située sur la face intérieure est protégée des poussières
- Le refroidissement ne présente pas de difficulté de conception, car les cellules sont placées en dessous du capteur. [14, 31,32].

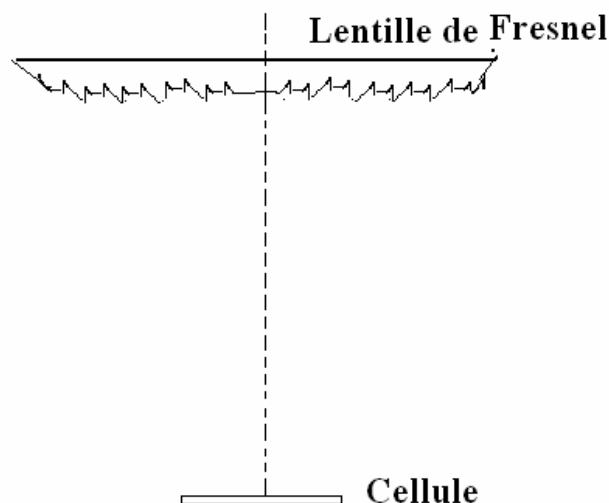


Figure (III.4) : Lentille de Fresnel

Il existe deux géométries de lentilles :

- ✓ Les lentilles a symétrie circulaire ces sont les plus utilisées

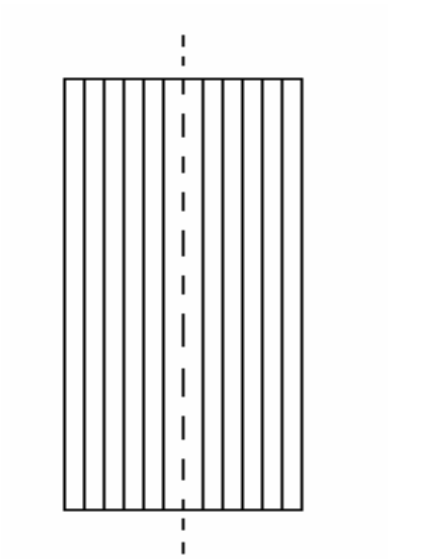
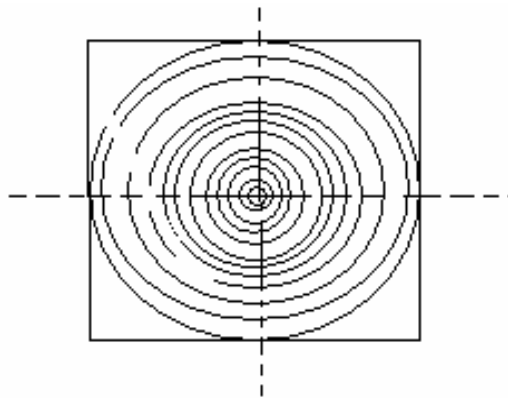


Figure (III.5) : Lentille circulaire

- ✓ Les lentilles rectangulaires ou les gravures sont parallèles



Figure(III.6) : Lentille rectangulaire

III-4.4. Avantages de la réfraction a la précision de la fabrication :

Un des avantages important des systèmes à réfraction sur les systèmes à réflexion est leur faible sensibilité ou imprécision de fabrication **Figure(III.7)**

Dans le cas d'un miroir, si le plan tangent au point d'incidence du rayon lumineux est désorienté d'un angle (α) par rapport a sa position théorique optimale, le rayon réfléchi est désorienté d'un angle (2α) [31]

Dans le cas de la réfraction a travers un prisme d'indice n , la désorientation n'est que $(\eta - 1)$ si est l'erreur sur cet angle au sommet.

Si $\eta = 1.5$

$$\text{On aura : } X_t / X_R = 1/4 \quad (\text{III.3})$$

Ou :

X_t : précision sur l'angle du rayon réfracté.

X_R : précision sur l'angle du rayon réfléchi.

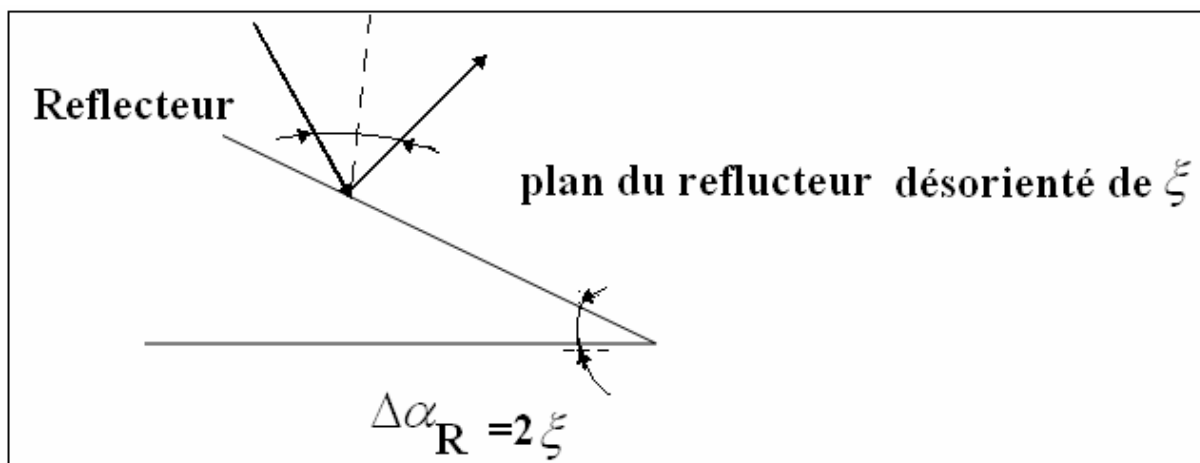
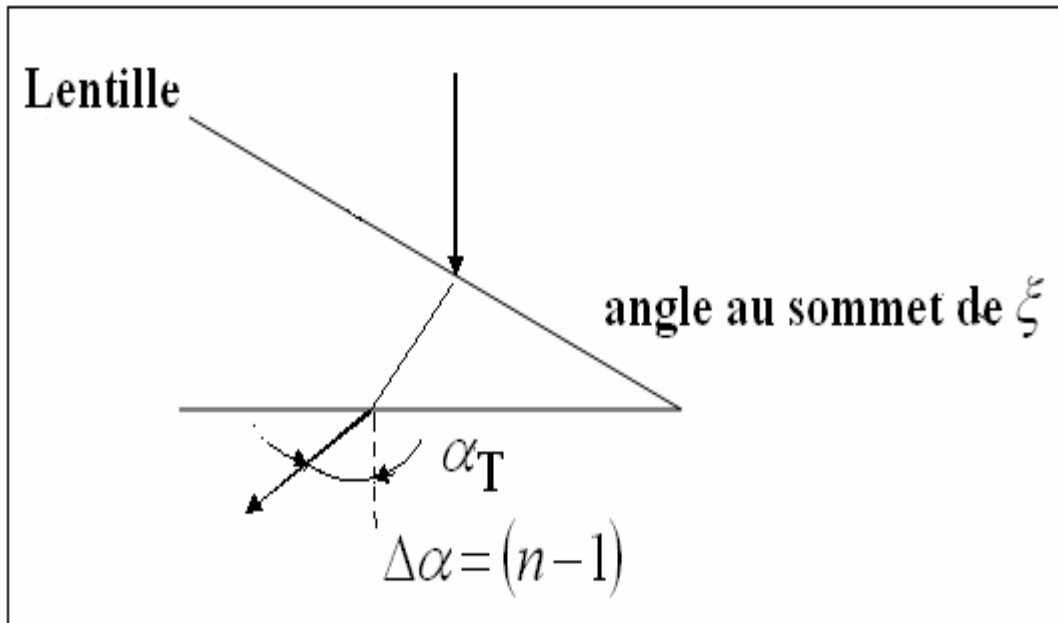


Figure (III.7): Influence des imprécisions de fabrication

III-5. Les panneaux solaires à concentration :

L'avantage essentiel des appareils à concentration est de permettre la réduction de la surface active de générateur solaire à puissance égale, la surface de concentration du système. Contrairement aux générateurs solaires thermomécaniques, on fait plus largement appel dans le domaine photovoltaïque à la concentration par lentilles de Fresnel. On utilise des lentilles concentriques et dans une moindre mesure des lentilles linéaires

Le plus souvent, ces lentilles sont en acryl ou en verre. Une bonne homogénéité de l'éclairement dans la plage focale est obtenue avec des lentilles de Fresnel ayant la forme d'un dôme, les rayons sur le bord de la lentille sont alors dérivés sur la tache focale sans déformation majeure par rapport aux rayons qui passent par le centre de la lentille.

Des lentilles de Fresnel concentriques en plastique ayant un facteur de concentration de 500 et un rendement optique 87 % a été mis au point, elles sont utilisées en association avec des piles à l'arséniure de galium [14. 31]

III-6. Le Taux de concentration

On a défini le taux de concentration théorique comme étant le rapport de la surface d'ouverture du concentrateur sur la surface de l'absorbant. [32]

$$X_{th} = \frac{\text{Aire de l'ouverture}}{\text{Aire de l'absorbant}} \quad (\text{III.4})$$

Cependant il existe des pertes par réflexion et par absorption. La radiation solaire n'est donc pas entièrement transmise à l'absorbant

Aussi on définit le rendement optique par :

$$\eta = \frac{\text{Radiation incidente sur l'absorbant}}{\text{Radiation incidente sur l'ouverture}} \quad (\text{III.5})$$

Le taux de concentration sur l'ouverture est donc donné par :

$$X = X_{th} \cdot \eta_{opt} \quad (\text{III.6})$$

III-7. Influence de la concentration sur les paramètres de la cellule :

La concentration de la lumière implique une augmentation de la puissance incidente sur la cellule solaire.

Une augmentation d'illumination implique une augmentation du rendement théorique des cellules, si on néglige bien sur les pertes dues à la résistance série R_s et l'élévation de la température. le courant de court circuit I_{sc} des cellules augmente linéairement avec la concentration, cependant V'_{oc} et FF augmentent légèrement sous l'effet de la concentration ,ce qui produit une augmentation nette de rendement de la pile solaire, en supposant que le courant de saturation à l'obscurité de la cellule solaire I_o est constant sous concentration et que les résistances parasites sont négligeables . . [34]

$$I_o = \frac{I_{sc1}}{e^{qV_{oc}/kT}} \quad (III.7)$$

Avec I_{sc} et V'_{oc} sous un soleil c'est dire sans concentration mais sous une concentration de X fois I_{sc} augmente jusqu'à $X * I_{sc}$ donc ,la tension de circuit ouvert sous la concentration V'_{oc} devient :

$$V'_{oc} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{XI_{sc}}{I_o}\right) \quad (III.8)$$

La substitution de l'équation dans et réarrangement donne :

$$V'_{oc} = V_{oc} + \frac{kT}{q} \ln(X) \quad (III.9)$$

$$\Delta V_{oc} = V'_{oc} - V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln(X) \quad (III.10)$$

Ou X est le taux de concentration et ΔV_{oc} est la variation V_{oc} due à la concentration

L'augmentation de V_{oc} produit également une petite élévation dans le FF

Le rendement de conversion de la photopile sous la concentration et l'influence de la résistance série sont données par l'expression suivant

$$\eta(X) = \eta_1 \left[1 + \frac{kT}{q} \log(X) - \frac{R_s X^2 I_{sc1}^2}{XP_i} \right] \quad (III.11)$$

Avec :

X : est le taux de concentration.

η : Le rendement de conversion sans concentration.

I_{sc1} : le courant de court circuit sous un soleil .

V_{oc1} : La tension de circuit ouvert sous un soleil.

P_i : La puissance incidente.

III-7.1.Limites de la concentration :

En pratique le rendement électrique en fonction de la concentration commence par augmenter conformément à la relation passe par un maximum et décroît.

Deux causes sont à l'origine de cette limitation, l'effet de la température et celui de la résistance interne de la cellule solaire. . [31]

III .7-2.Effet de la température :

Le comportement d'une pile solaire sous la concentration dépend de la tension de circuit ouvert de cellules V_{OC} de l'absorption de l'infrarouge, de la sensibilité de la température et de la résistance série.

L'augmentation de la température de cellules abaisse la tension de circuit ouvert V_{oc} des cellules et le facteur de forme FF mais augmente légèrement le courant I_{sc} des cellules .la perte dans V_{oc} dépend de la tension initiale de circuit ouvert de la pile solaire et de la température initiale. . [14,31,35]

$$\frac{1}{V_{OC}} \frac{dV_{OC}}{dT} = - \frac{V_{go} - V_{oc} + (KT / q)}{T} \quad (III.12)$$

Le facteur de forme FF peut être approché approximativement par l'équation suivante :

$$\frac{1}{FF} \frac{dFF}{dT} \approx \left[\frac{1}{V_{OC}} \frac{dV_{OC}}{dT} - \frac{1}{T} \right] / 6 \quad (III.13)$$

Cependant, il existe une expression pour approche l'augmentation légère de I_{sc} avec la température. L'effet est très petit et être considéré constant pour le plus part des cellules solaires en silicium.

$$\frac{1}{I_{SC}} \frac{dI_{SC}}{dT} \approx 0.0006 / K \quad (III.14)$$

A partir des équations la variation de la puissance maximale avec la température P_{max} est donnée par l'équation suivante :

$$P_{MAX} = \frac{1}{P_m} \frac{dP_M}{dT} = \frac{1}{V_{OC}} \frac{dV_{OC}}{dT} + \frac{1}{FF} \frac{dFF}{dT} + \frac{1}{I_{SC}} \frac{dI_{SC}}{dT} \quad (III.15)$$

III .7-3.Effet de la résistance série de la cellule sous la concentration :

La résistance série de la pile solaire a un effet beaucoup plus grand sous la concentration.

Tenant compte de la relation et sachant qu' I_{sc} varie linéairement avec la concentration X , le terme $R_s \cdot I$ deviendrait rapidement prohibitif si R_s n'est pas ramenée des valeurs très faibles. . [14 ,36]

La figure suivante montre comment l'augmentation de rendement de conversion sous la concentration est réduite par l'effet de la résistance série R_s . Le rendement de conversion des cellules a été normalisé en un sous un soleil afin de donner le changement relatif de rendement de pile solaire. Les courbes théoriques ont été calculées en augmentant l'intensité de la lumière et ainsi le I_{sc} , et en déterminant le point maximum de puissance de la cellule solaire comme décrit par l'équation. . [37]

$$I = I_{sc} - I_o \left[\exp\left(\frac{qV - IR_s}{KT}\right) - 1 \right] \quad (III.16)$$

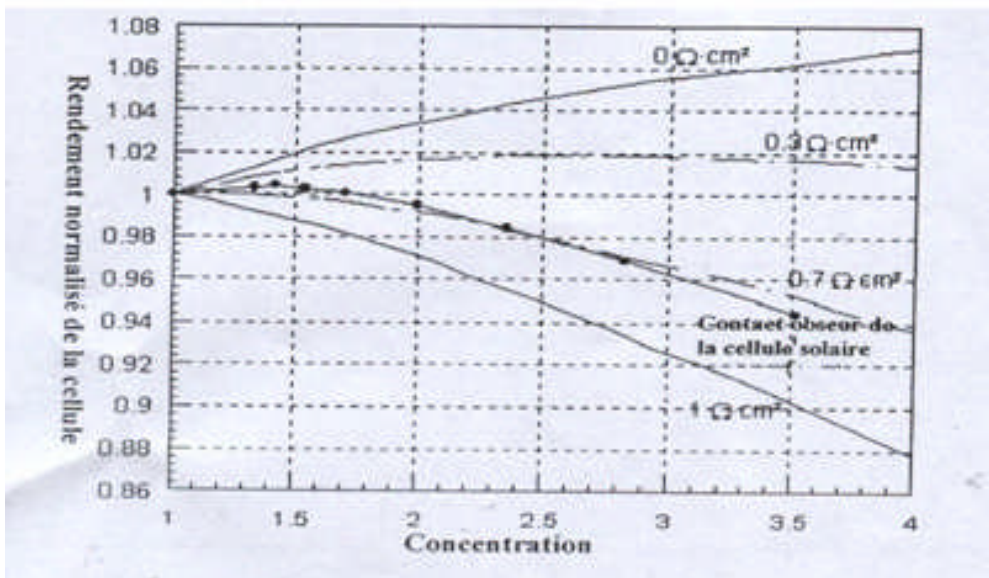


Figure (III.8) : la variation de rendement de conversion avec la concentration pour différentes valeurs de la résistance série

III-8.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté que le plupart des matériaux semi conducteur (CIS, CdTe, GaAs) ont un front d'absorption raide est des longueurs d'absorption inférieur au (μm), le principe de différents concentrateurs et les aspects qui définissent les règles de conception des cellules solaires sous concentration

Enfin nous avons étudié l'effet de la concentration solaire sur les paramètres de la cellule solaires V_{oc} I_s , et la variation de rendement de conversion en fonction du taux de concentration pour différentes valeurs de la résistance série.

IV-1 -Introduction :

Dans ce chapitre nous étudions d'abord l'influence des paramètres internes et externes sur la caractéristique I (V) ; ensuite l'étude de la concentration solaire sur différentes cellules. Et comparative des performances de système PV avec et sans concentration de la lumière

IV-2-Le modèle mathématique de la cellule solaire :

La caractéristique courante tension I (v) se présente sous forme d'une équation non linéaire, alors que le travail numérique a porté sur la résolution de l'équation I(v) :

$$I = -I_L + I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{nKT}\right) - 1 \right] + \frac{V + R_s I}{R_{SH}} \quad (IV-1)$$

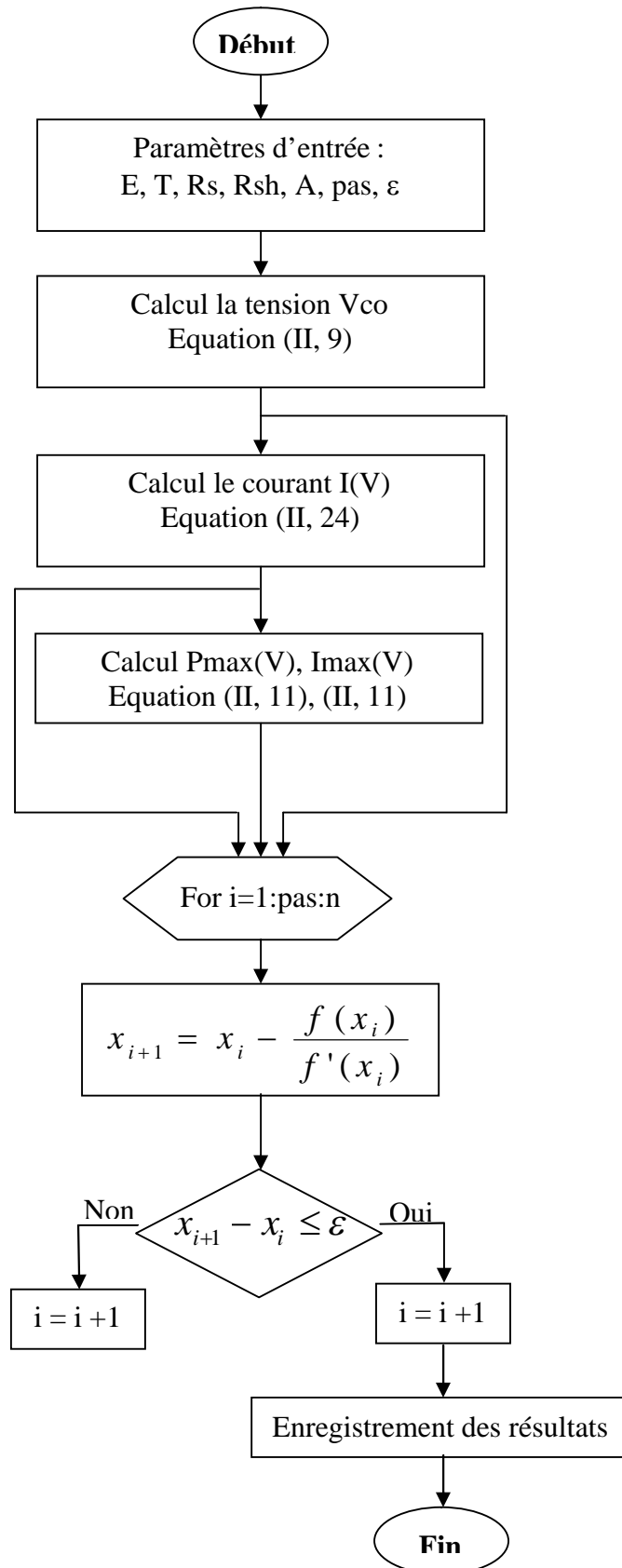
Qui décrit le comportement de la cellule solaire sous rayonnement solaire concentré et à partir duquel on peut déterminer ses paramètres ou caractéristiques électriques internes et externes et sont influencés sur le comportement de cellules.

Pour résoudre l'équation I(v) plusieurs méthodes de résolution approchées peuvent être utilisées, ces méthodes sont : [33]

- La méthode de dichotomie
- La méthode de Newton Raphson
- La méthode de Lagrange
- La méthode de point fixe

La méthode choisie pour notre étude est la méthode de Newton Raphson.

IV-3-L'organigramme principal :



Organigramme global pour le calcul de I(V) par la méthode de Newton Raphson

A partir de la simulation réalisée de notre modèle numérique d'une cellule solaire, par la Newton Raphson, nous obtenons la caractéristique courant tension comme indiquée sur la figure (IV-1)

Cette dernière nous renseigne complètement sur :

- Le comportement d'une cellule solaire éclairée autant qu'un générateur.
- Elle retrace la relation entre la tension a les bornes et l'intensité qu'elle débite.

Le courant I généré par la photopile est donc en fonction de la tension de travail V de la cellule :

-pour des tensions inférieurs a 0.25 à 0.35V, le courant reste indépendant de la tension.

Le dispositif se comporte comme un générateur de courant. Ce courant est due au courant de court circuit généré par le rayonnement solaire.

-à partir des tensions supérieures à 0.35V le courant varie et la tension reste pratiquement constante.

Le dispositif se comporte comme un générateur de tension, il s'annule pour une tension maximale de circuit ouvert V_{oc} . A partir de la courbe en peut tirer la puissance de point optimale (V_m , I_m).

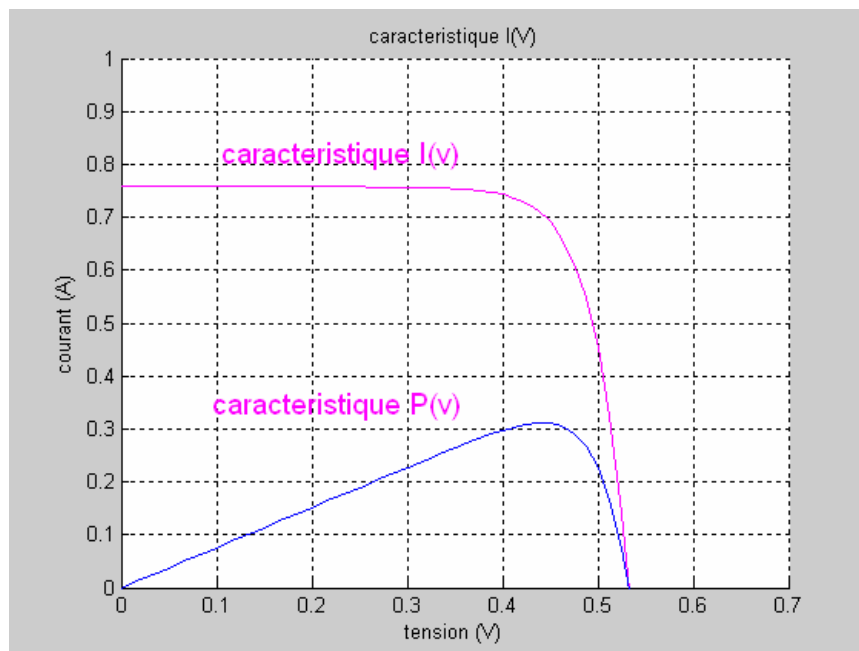


Figure IV -1 Caractéristique I(V)des cellules solaires et p(V)

IV-4-Les' influence des paramètres des cellules sur les caractéristiques courant-tension :

a)-L'influence de l'éclairement :

Le courant I_{sc} est une fonction linéaire de L'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

Dans La figure (IV-2) l'accroissement du courant de court circuit est beaucoup plus important que l'accroissement de la tension de circuit ouvert.

Alors il représente l'augmentation du flux lumineux ou l'éclairement se traduit en somme par le déplacement de la caractéristique suivant l'axe de courant.

La puissance optimale (Max) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.

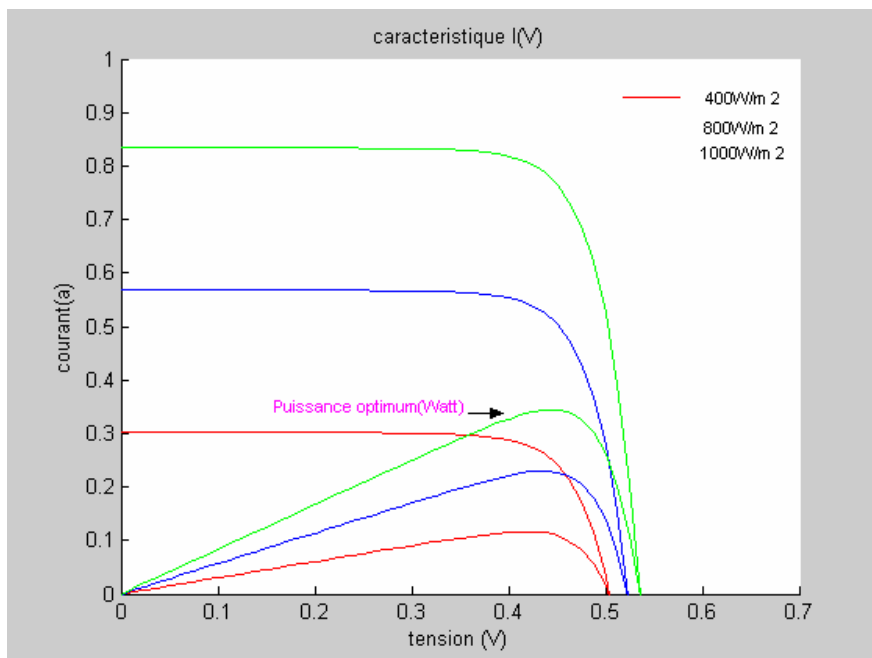


Figure (IV -2) l'influence de l'éclairement sur la Caractéristique I(V) et P(V)

b)-L'influence de la température :

La Figure (IV-3) représente la réaction de la photopile à la variation de la température nous observons une augmentation du courant de court circuit et une diminution de la tension de circuit ouvert qui décale le point de puissance maximale.

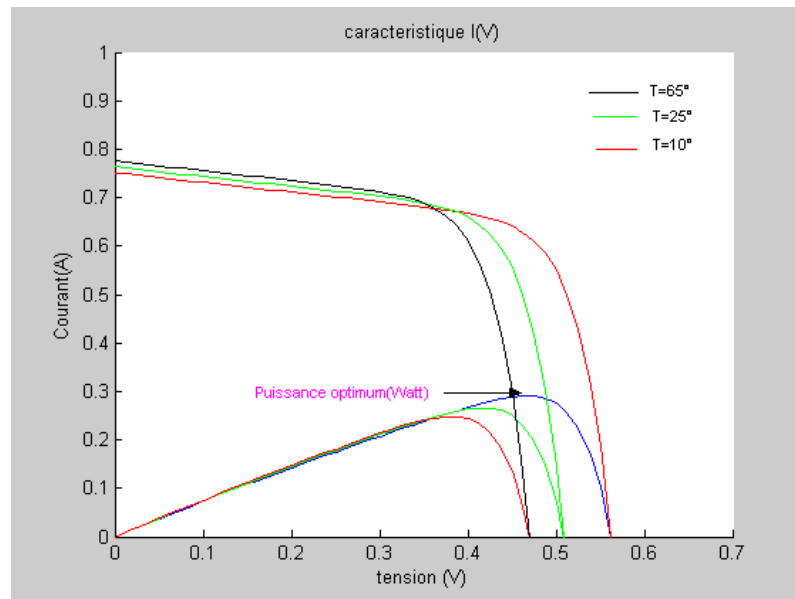


Figure (IV -3) l'influence de la température sur la Caractéristique I(V) et P(V)

c)-L'influence de la résistance série :

L'augmentation de la résistance série se traduit par une diminution de pente de la courbe de puissance

Effet de la résistance série se traduit par une réduction de la tension autour du Voc, ce qui provoque une modification de l'allure de la courbe I (v) comme illustre sur la figure suivant :

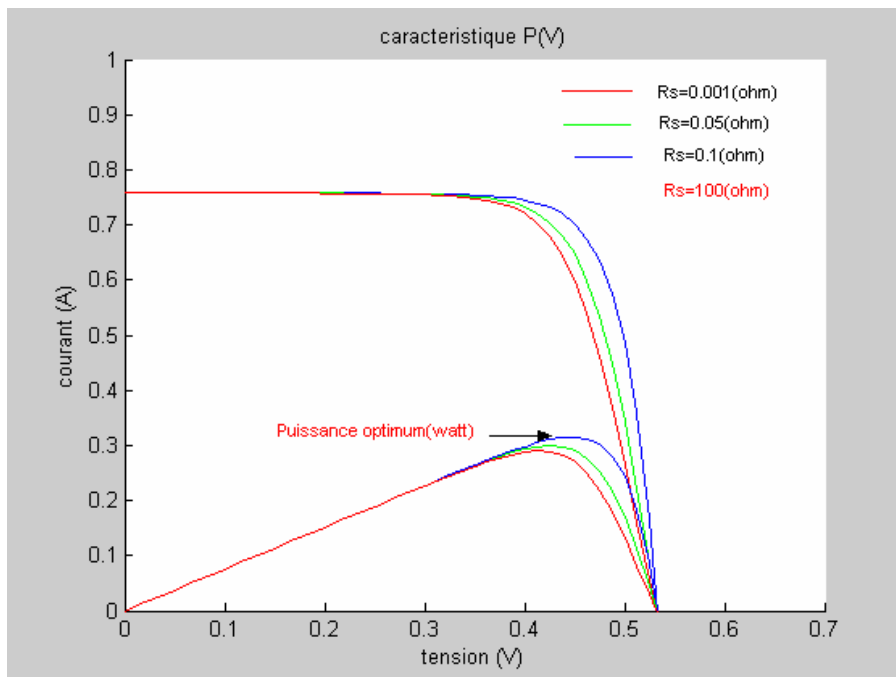


Figure (IV -4) l'influence de la résistance série sur la Caractéristique I(V) et P(V)

d)-L'influence de la résistance parallèle :

L'influence de la résistance parallèle sur la caractéristique courant tension se traduit par une diminution de la courbe I (v) autour de courant circuit ouvert.

La puissance fournie par une cellule solaire varie avec sa résistance parallèle, plus cette résistance est élevée plus la puissance fournie est importante.

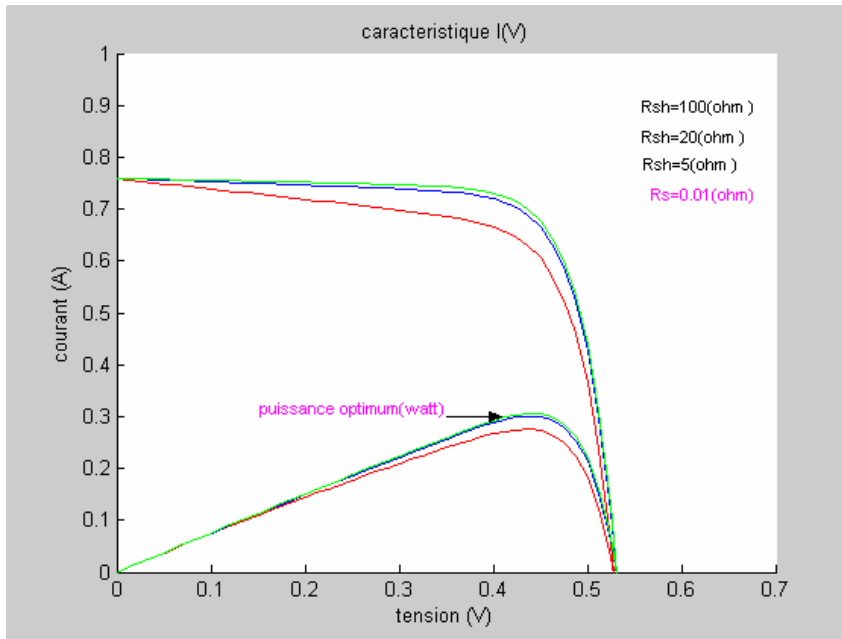


Figure (IV -5) l'influence de la résistance parallèle sur la Caractéristique I (V) et P (V)

IV-5-La caractéristique I (v) sous concentration :

La concentration du rayonnement solaire, en raison d'un renforcement de la génération optique, produit une augmentation de la densité de courant de court circuit.

Cette modification induit aussi la valeur de la tension de circuit ouvert légèrement supérieure à celle mesurée sous rayonnement non concentré. [38]

La caractéristique courante tension est donnée par l'équation suivante :

$$I = X * I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{A U_T} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (IV-2)$$

Notre étude numérique nous a permis d'avoir l'évolution de la caractéristique de l'équation non linéaire I (v) sous concentration des différentes cellules.

Les performances des cellules solaires de S=1cm² sont regroupés dans le tableau suivant :

AM1.5	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	FF (%)	η (%)
Silicium poly	36.5	0.636	80.4	18.6
GaAs	16	0.981	66	10.33
AlGaAs	3.3	1.282	73	3.10
CIGS	35.07	0.678	78.89	18.5

Tableau (IV-1)- Les Caractéristique des différentes cellules photovoltaïques études [38.39]

IV-6- Résultats obtenus pour les cellules sous la concentration :

Le courant de court circuit I_{sc} des cellules augmentent linéairement avec la concentration cependant V_{oc} augmentent légèrement sous l'effet de la concentration .les figures suivant représenté l'influence de la concentration sur la caractéristique I(V) pour différentes cellules Solaire

a)-Pour Si (n/p) :

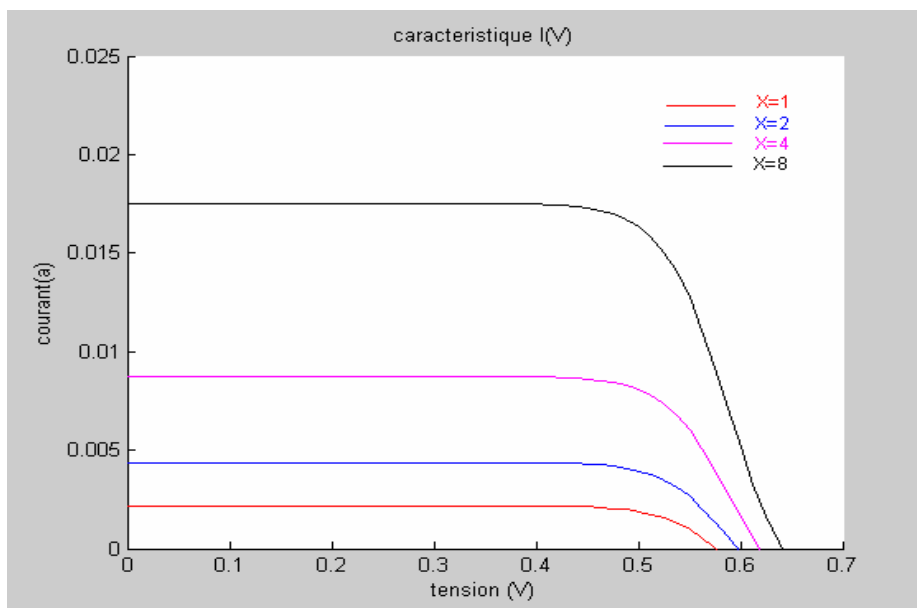


Figure (IV -6) l'influence de la concentration solaire sur la Caractéristique I (V) de cellule au silicium poly

b)-Pour GaAs :

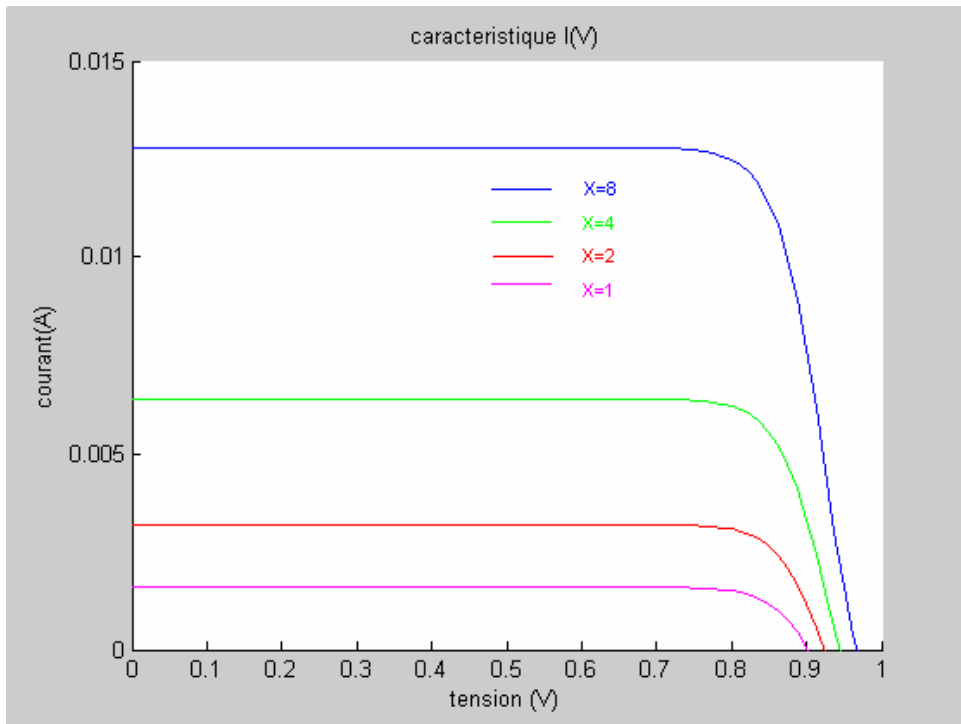


Figure (IV -7) l'influence de la concentration solaire sur la Caractéristique I (V) de cellule au GaAs

c)-Pour AlGaAs :

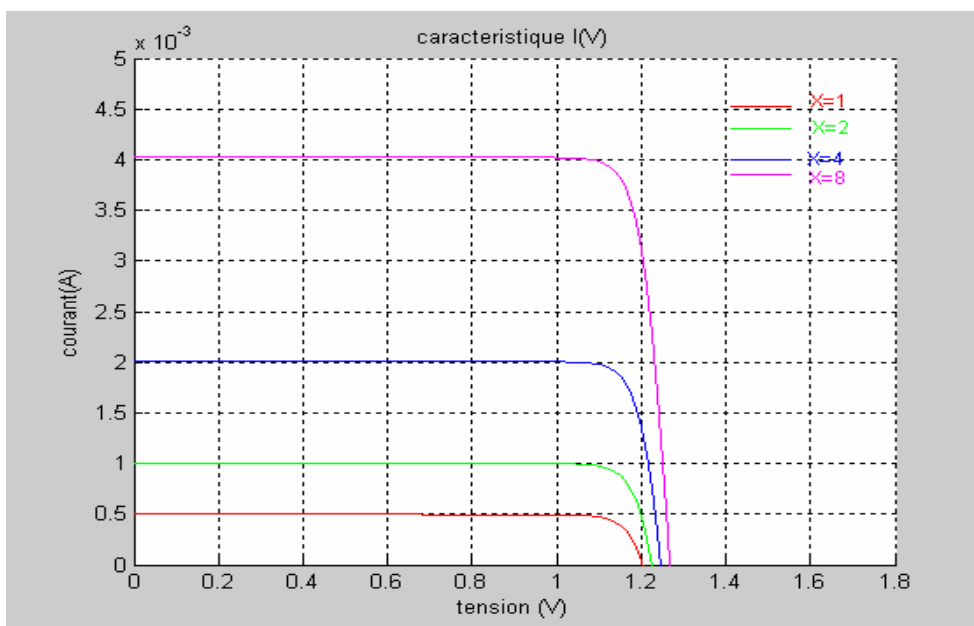


Figure (IV -8) l'influence de la concentration solaire sur la Caractéristique I (V) de cellule au AlGaAS

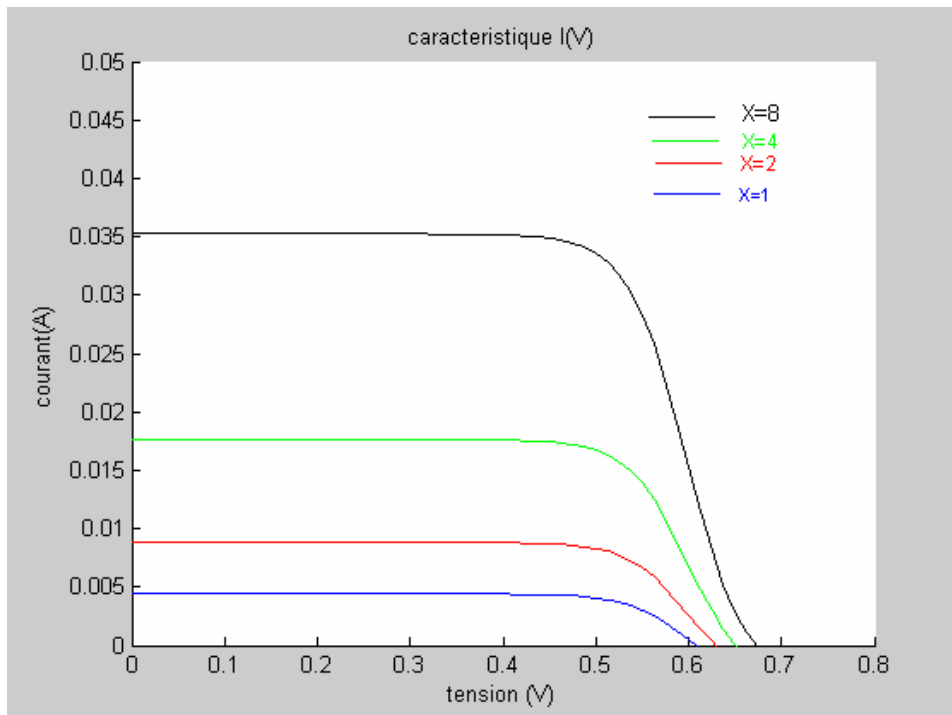
d)-Pour CIGS :

Figure (IV -9) l'influence de la concentration solaire sur la Caractéristique I (V) de cellule au CIGS

IV-7 -L'influence de la concentration solaire sur la tension de circuit ouvert :

Les figures suivantes représentent la variation de la tension de circuit ouvert en fonction des taux de concentration, la tension V_{oc} varie rapidement avec des taux de concentration petits mais a peu près constante pour des taux de concentration élevés.

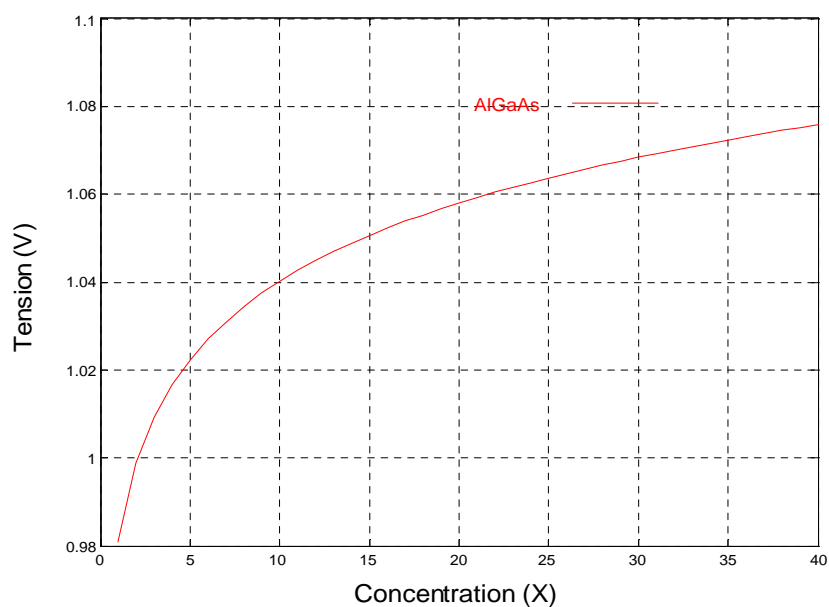


Figure (IV -10) l'influence de la concentration solaire sur la tension V_{oc} de cellule au AlGaAs

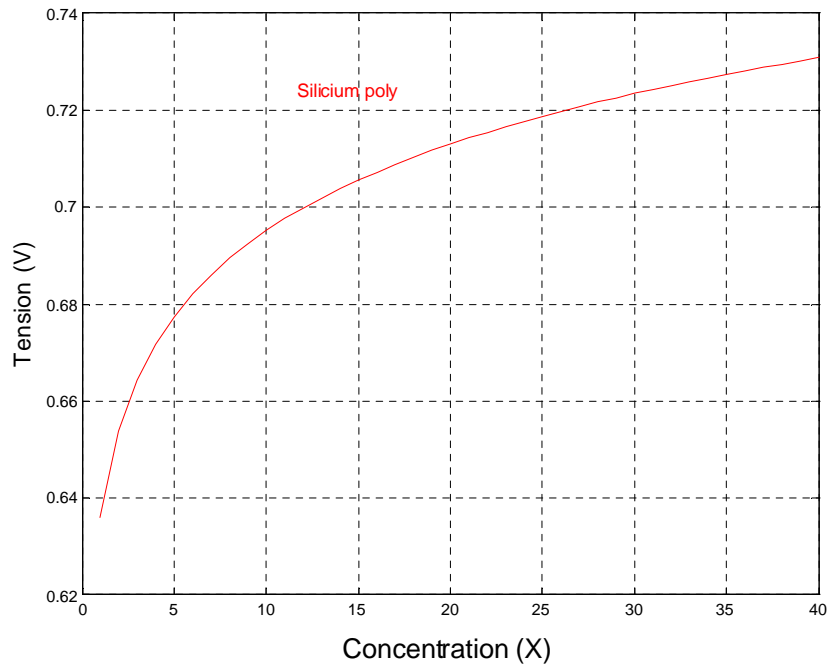


Figure (IV -11) l'influence de la concentration solaire sur la tension V_{oc} de cellule au Silicium poly

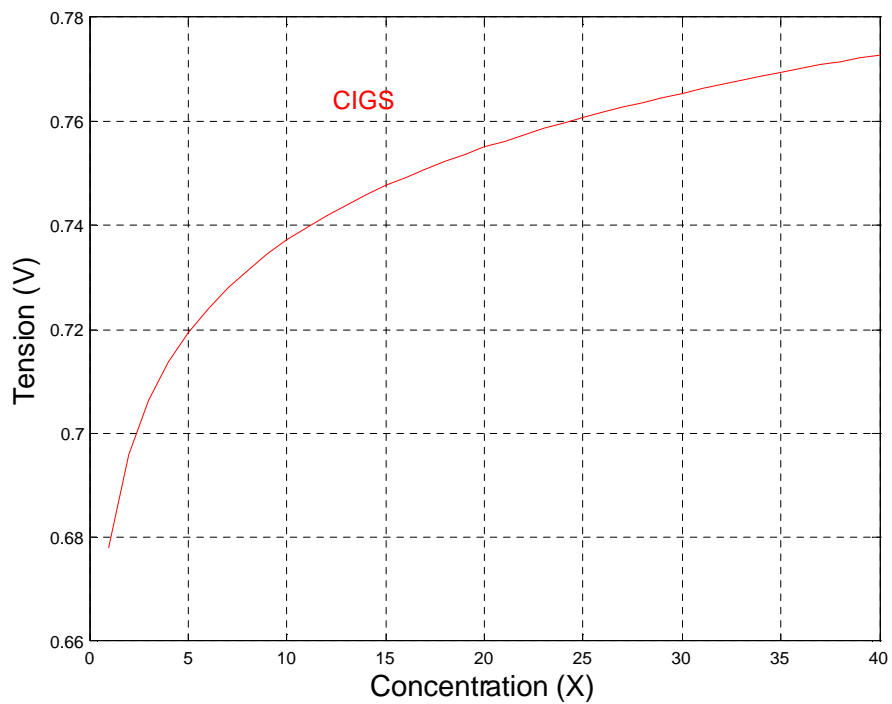


Figure (IV -12) l'influence de la concentration solaire sur la tension V_{oc} de cellule au CIGS

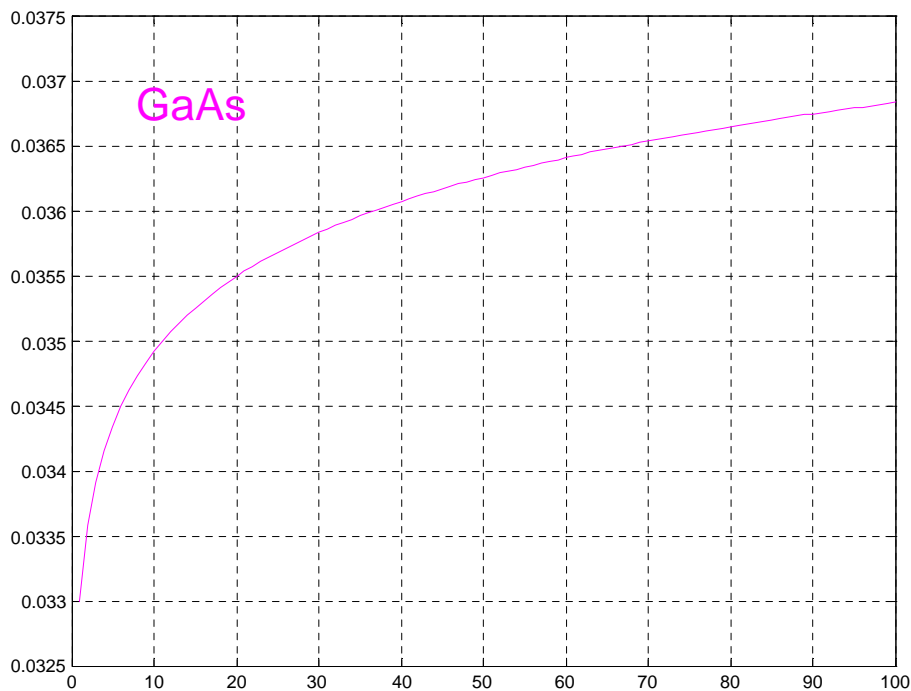


Figure (IV -13) l'influence de la concentration solaire sur la tension V_{oc} de cellule au GaAs

IV-8 -L'influence de la concentration solaire sur le rendement :

Les figures suivantes montrent la variation de rendement de conversion des cellules solaires (silicium poly, CIGS, AlGaAs, GaAs) en fonction du taux de concentration pour deux valeurs de la résistance série. Nous avons remarqué que pour la résistance série égale à 0.1Ω le rendement augmente rapidement avec la concentration mais pour la résistance série égale à 1Ω on remarque une décroissance du rendement pour les taux de concentration supérieurs à 25 soleils pour les cellules à silicium poly et CIGS est liée à l'effet cumulé des pertes joules dans la résistance série de la cellule et de l'élévation de température mais pour les cellules de GaAs et AlGaAs montre que le rendement augmente rapidement avec la concentration pour les deux valeurs de résistances série.

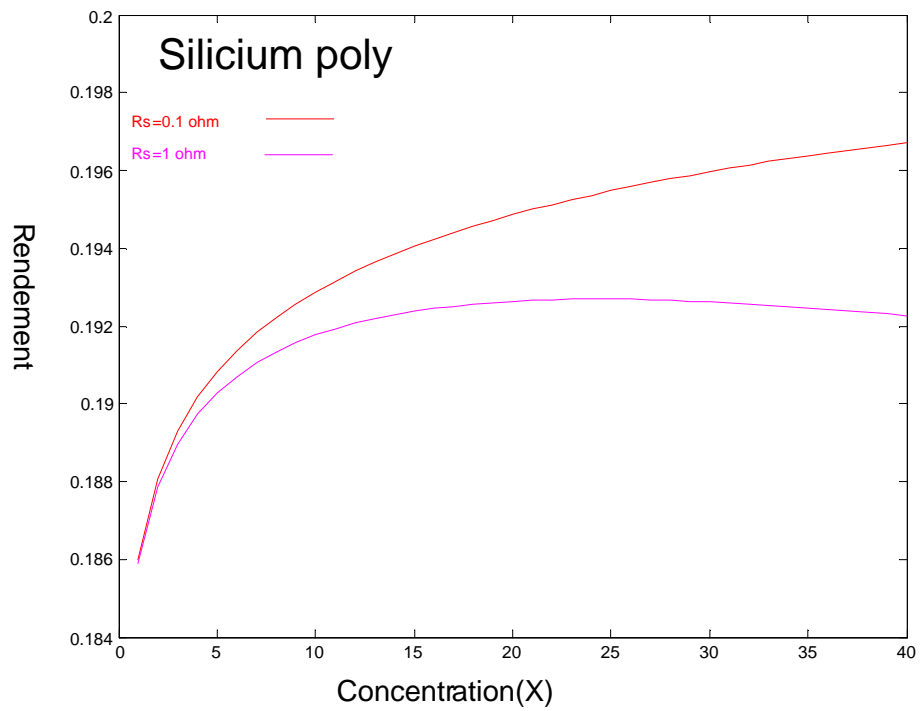


Figure (IV -14) l'influence de la concentration solaire sur le rendement de cellule au Silicium poly

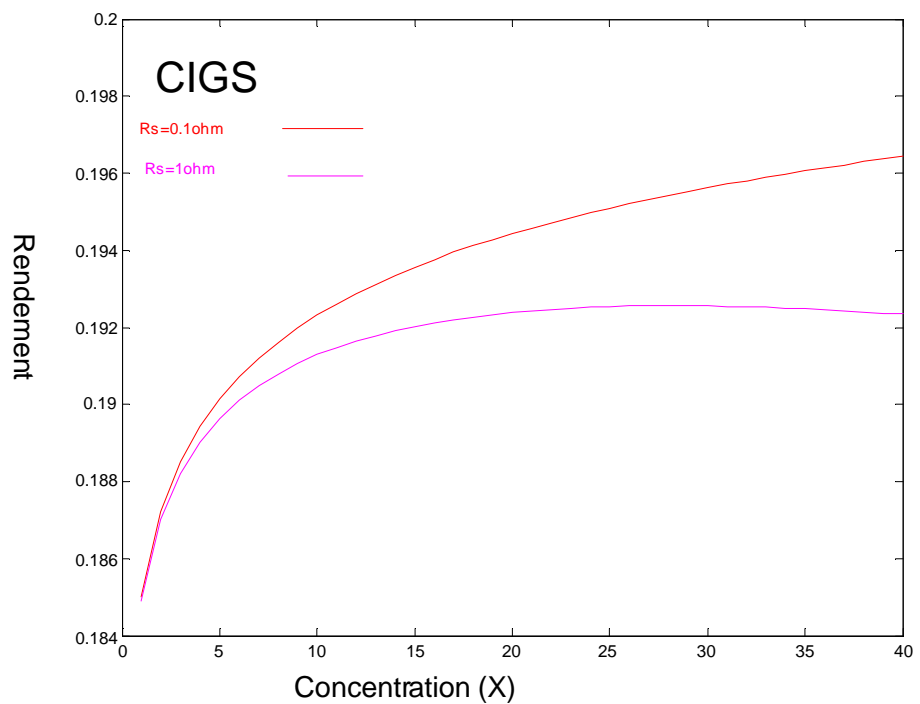


Figure (IV -15) l'influence de la concentration solaire sur le rendement de cellule au CIGS

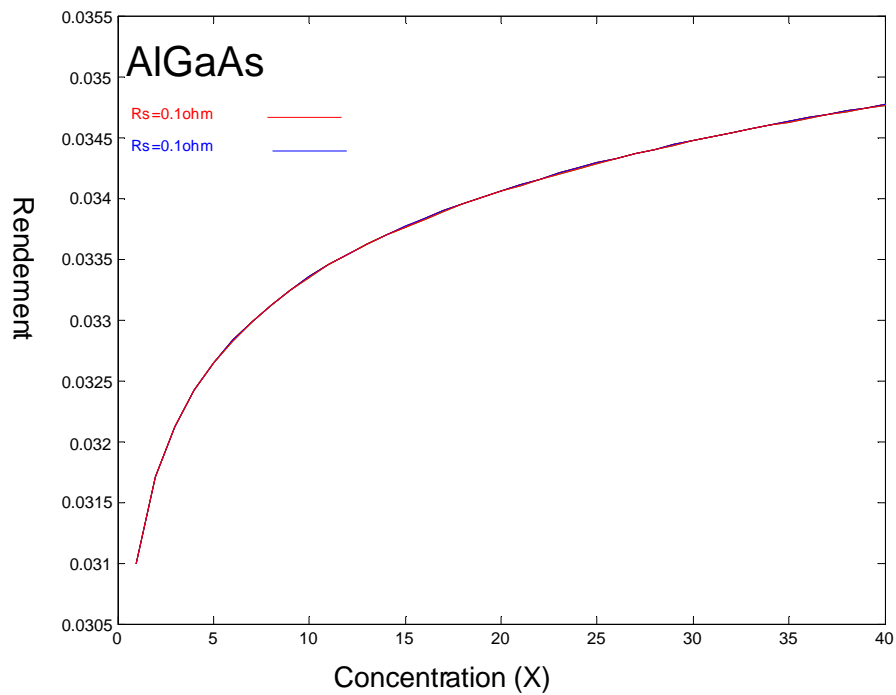


Figure (IV -16) l'influence de la concentration solaire sur le rendement de cellule au AlGaAs

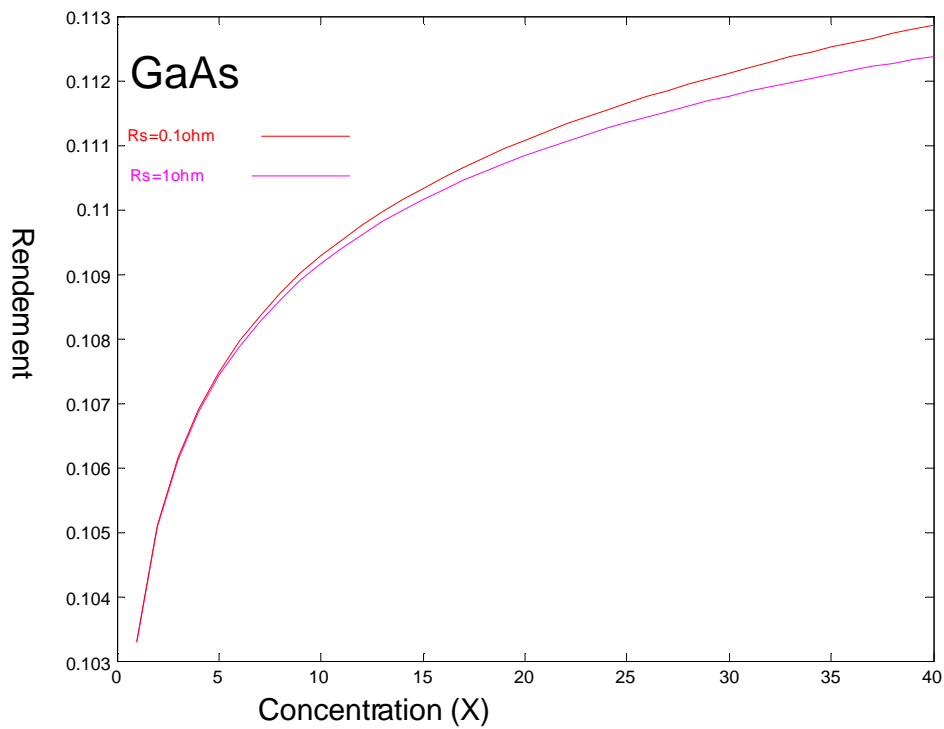


Figure (IV -17) l'influence de la concentration solaire sur le rendement de cellule au GaAs

IV-9. La variation du rendement de conversion des cellules pour fortes concentration :

Les figures suivantes mettent en évidence de la diminution du rendement pour les fortes concentrations on remarque que cela décroît pour (silicium poly , CIGS) mais pour (AlGaAs ,GaAs) le rendement augmente rapidement avec la concentration forte .

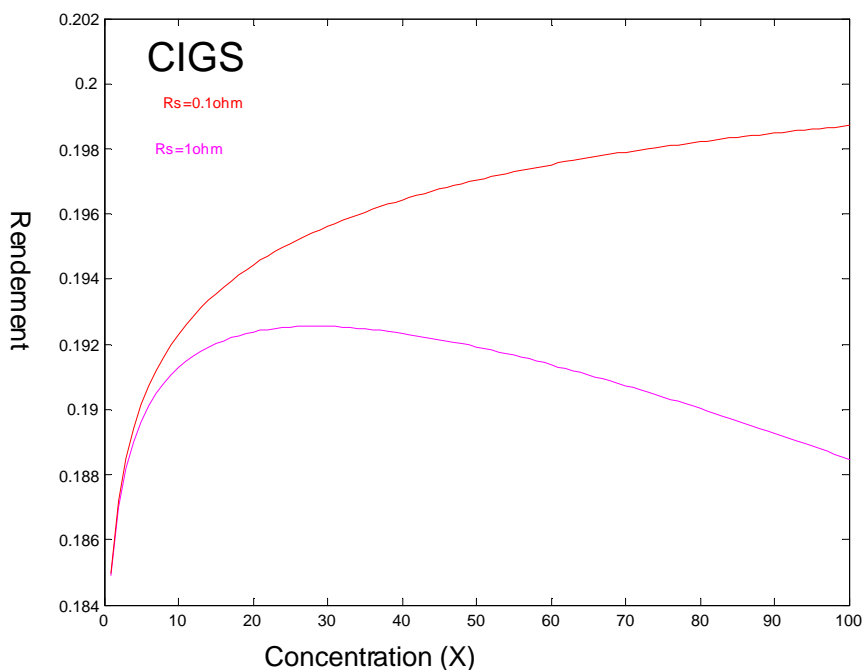


Figure (IV-18) La variation du rendement de conversion de cellule au CIGS pour les fortes concentrations

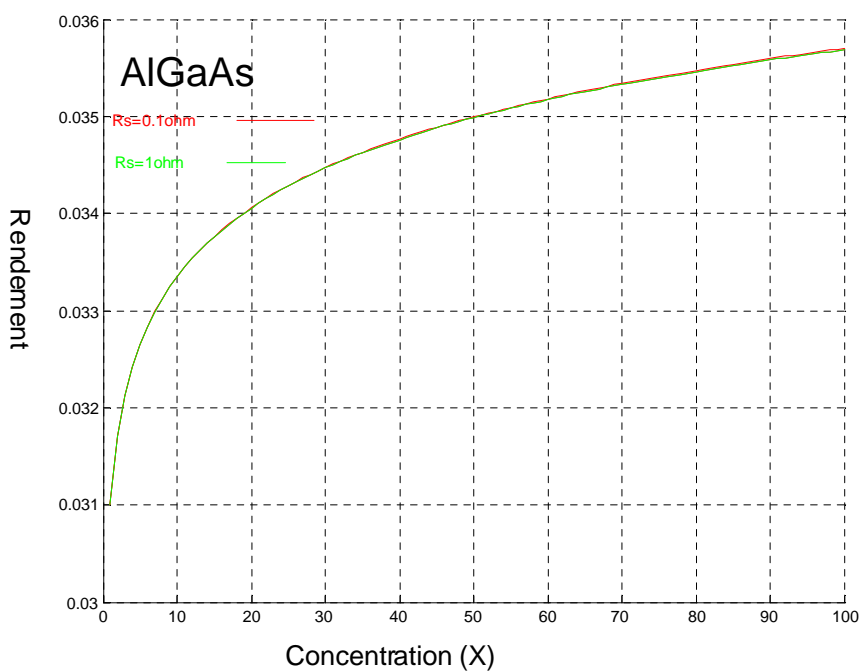


Figure (IV-19) La variation du rendement de conversion de cellule au AlGaAs pour les fortes concentrations

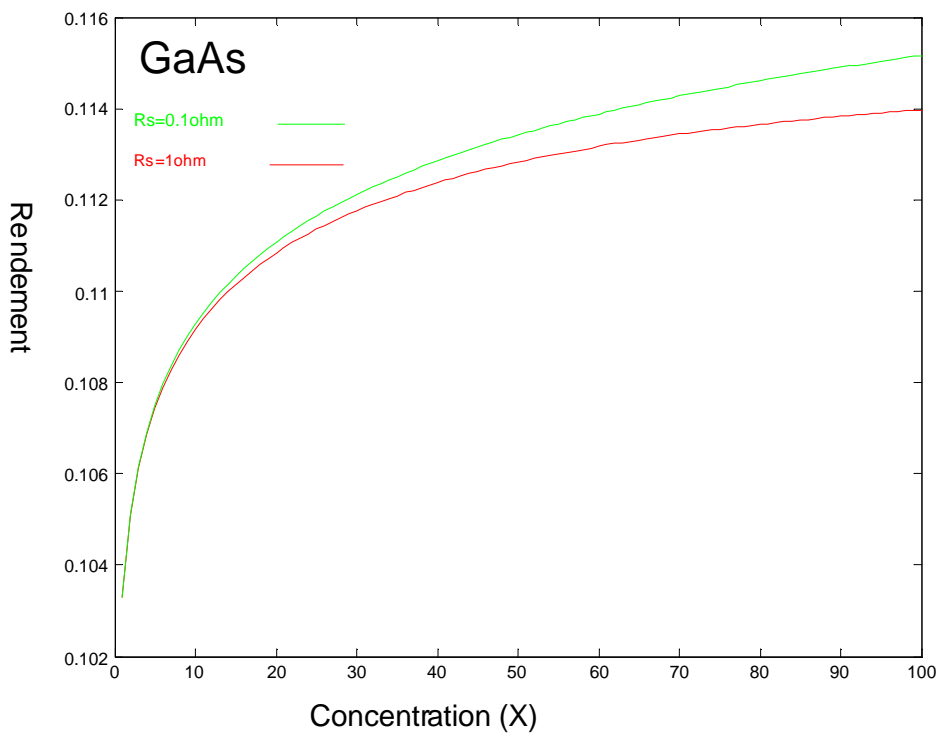


Figure (IV -20) La variation du rendement de conversion de cellule au GaAs pour les fortes concentrations

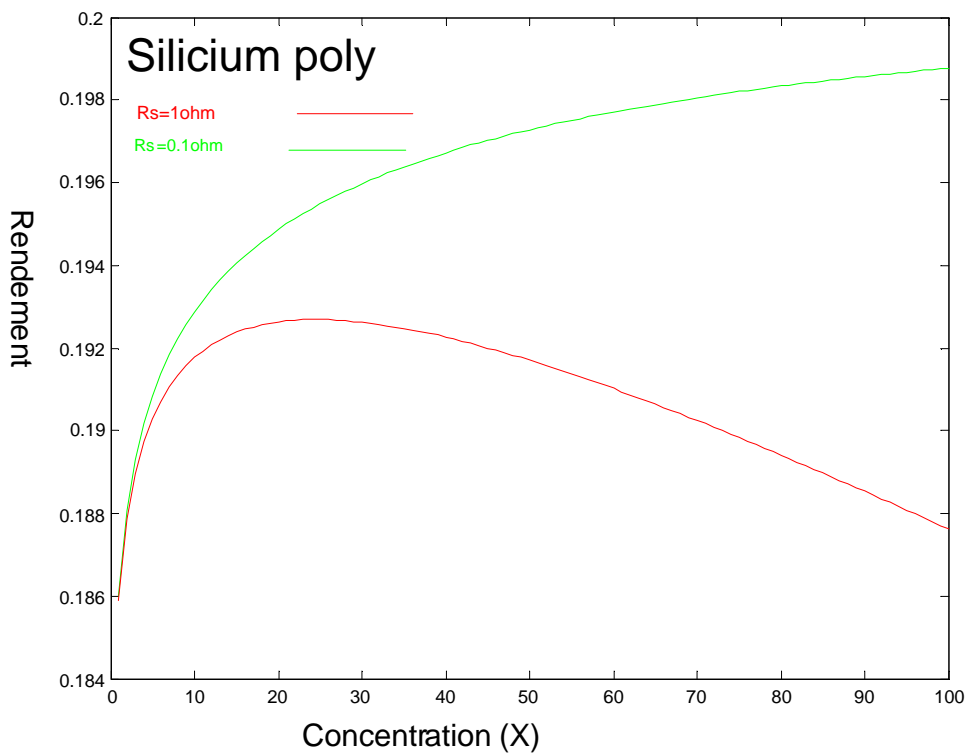


Figure (IV -21) La variation du rendement de conversion de cellule au Silicium poly pour les fortes concentrations

IV-10. La comparaison entre les cellules solaires sous la concentration :

Les figures suivantes montrent que l'augmentation du taux de concentration produit une élévation du rendement de conversion pour les cellules (silicium poly, CIGS, AlGaAs, GaAs).

- ❖ La figure (IV.22) présente que le Si poly cristallin est le meilleur matériau utilisé sous l'effet de la concentration. Mais la décroissance du rendement pour les taux de concentration supérieurs à 25 soleils est liée à l'effet des pertes joules dans la résistance série de la cellule et l'élévation de température.

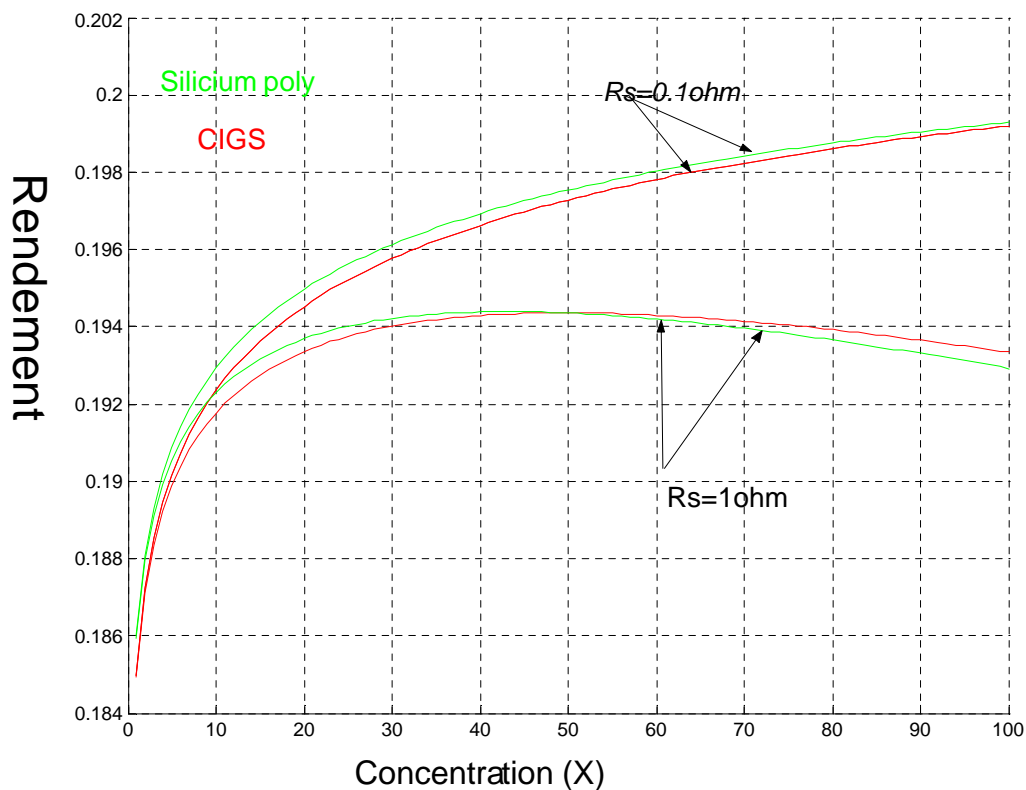


Figure (IV -22) La variation du rendement de conversion de cellule au Si poly et CIGS

- ❖ La figure (IV.23) présente que le GaAs est le meilleur matériau utilisé sous l'effet de la concentration par rapport à AlGaAs, mais présente que le rendement augmente pour les fortes concentrations à résistance série de la cellule et l'élévation de température.

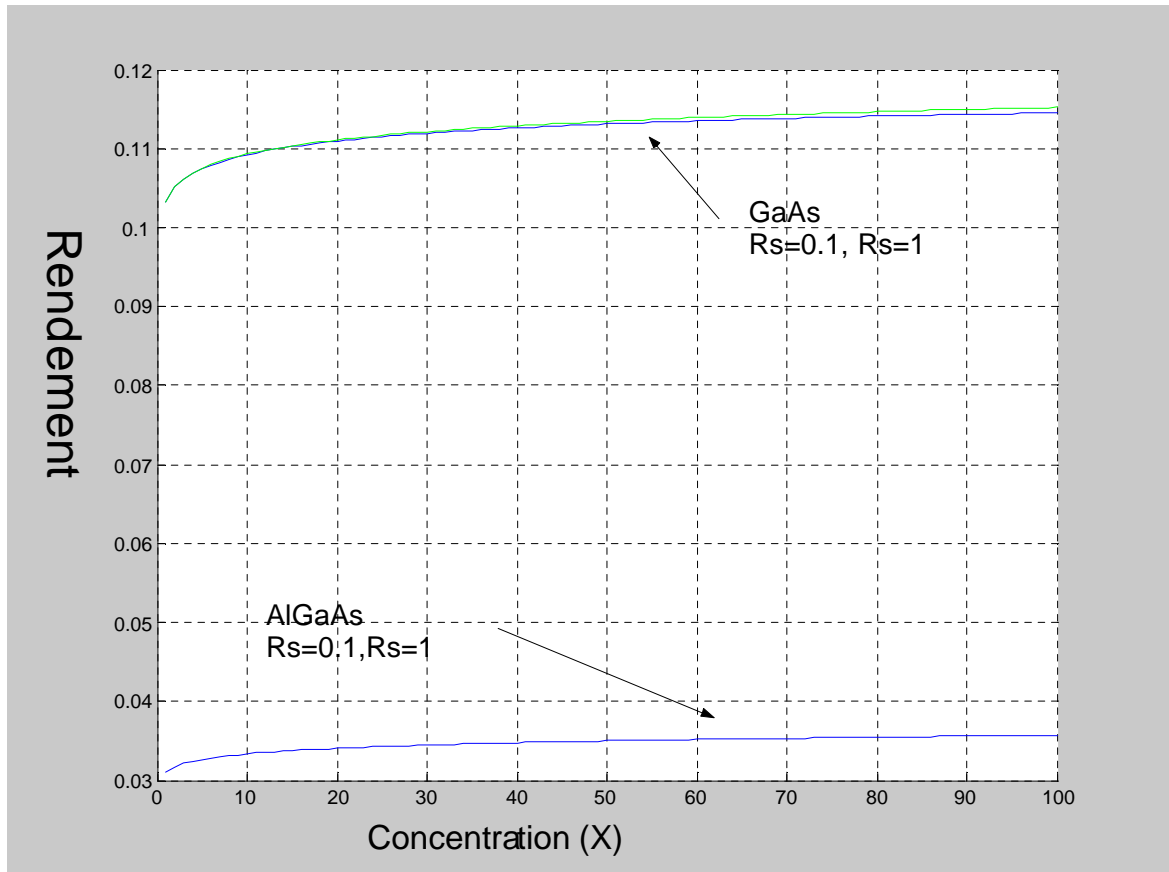


Figure (IV-23) La variation du rendement de conversion de cellule au GaAs et AlGaAs

IV-11.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons consacré à la présentation et à l'analyse des résultats de la simulation.

On vu l'influence de plusieurs facteurs sur la caractéristique courant tension ce qui a permis la détermination des différentes valeurs optimales de ces facteurs pour le bon fonctionnement de la cellule solaire.

La concentration du rayonnement solaire, en raison d'un renforcement de la génération optique, produit une augmentation de la densité du courant de court circuit, cette modification induit aussi une valeur de la tension de circuit ouvert, une augmentation du taux de concentration produit une élévation du rendement de conversion., décroissance du rendement pour les taux de concentration supérieurs a25 soleils pour le cellules a **silicium**

poly et **CIGS** est liée à l'effet cumulé des pertes joules dans la résistance série du cellule et de l'élévation de température .contraire pour **GaAs** et **AlGaAs**.

IV-11. Partie expérimentale :

IV-11.1 . Introduction :

L'effet de l'éclairement sur la caractéristique I (V) et la puissance dissipée pour différents heurs du jour et différents mois de l'année seront relevés. L'effet de La concentration solaire devra être étudié.

IV-11.2.Procédures d'installation :

Afin de réaliser le montage du générateur solaire dans les meilleures conditions, il est nécessaire de suivre scrupuleusement la procédure suivante :

- Mesures de l'ensoleillement.
- Courbe I (V) d'une cellule solaire.

a)-La puissance débitée :

Le calcul de cette puissance se fait par l'utilisation d'un pyranomètre, c'est un instrument qui mesure le rayonnement solaire globale. [40]



Figure. (IV.24) : le pyranomètre

Après la mesure du rayonnement solaire globale nous avons besoin d'un autre instrument qui affiche la valeur de mesure, pour cela nous allons utiliser l'intégrateur solaire.



Figure. (IV.25) : intégrateur solaire

Le SOLRAD radiation indicateur est une lecture portative / intégrateur pour les types de kipp & sondes du Zonen (pyranomètre dans notre application).

L'indicateur de la radiation peut intégrer aussi les valeurs de mesure. Réinitialisation manuelle et réinitialisation automatique de l'intégrateur peuvent être sélectionnées. [41]

La valeur de mesure réelle et totale de l'intégration peut être transmis à un ordinateur personnel à travers un « COM »-Port. L'indicateur de la radiation est délivré avec un programme PC qui vous permet d'entrer des valeurs de mesure sur disk, exposition valeurs en temps réel et graphiques et lecture et entrepose les valeurs automatisées.



Figure. (IV.26) : mesure de l'ensoleillement par l'utilisation d'un Pyranometre, Intégrateur et un Ordinateur

IV-11.3. Résultat d'expérience :

a)- -Mesure de l'ensoleillement :

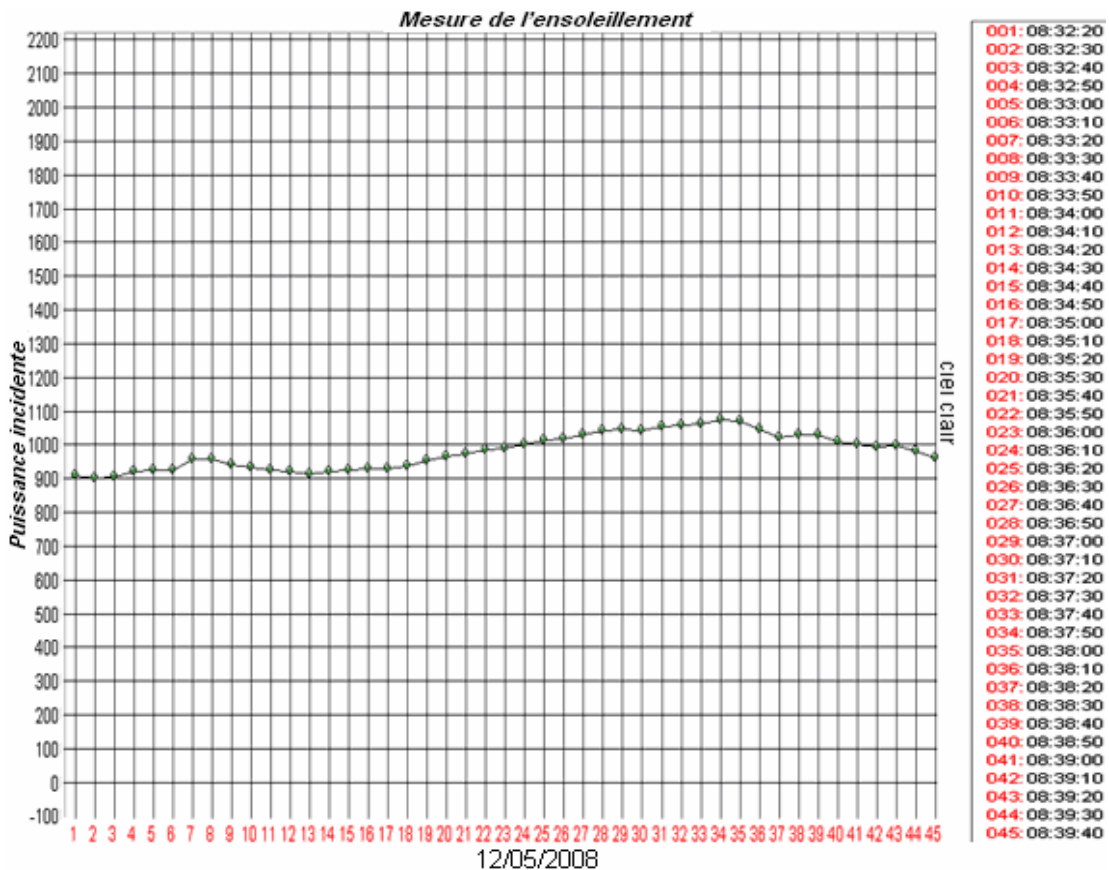
Les figure (IV.27, IV.28, IV.29, IV.30, IV.31, IV.32, IV.33, IV.34) représente les graphes de l'expérience, ces graphes montre la variation de l'ensoleillement durant deux jours (12-05-2008 et 21-06-2008 au solstice d'été), nous avons pris ces graphe chaque 10 seconde a partir de 08.00 jusqu a 17.00.

Donc l'ensoleillement est dépende de quatre saison (été, printemps, hiver ou automne), le temps de journées (matin ou soir) et la nature de ciel (clair, nuage ou intermédiaire).

Pour la date de 12-05-2008 (printemps) et le ciel clair, l'ensoleillement est prendre une valeur maximale de **1450 W/m²** à **14h : 37 :20** et atteint à une valeur minimale de **123 W/m²** à **16h : 51 :10.** avec ciel nuage.

Mais pour la date de 21-06-2008 (solstice d'été) avec le ciel clair, l'ensoleillement est augmenter jusqu'a **1500 W/m²** à **12h : 34 :30**, et démunie à le soir (17:08:30), où l'ensoleillement égale à **386W/m²** **17h : 08 :30 du soir.**

Pour de bonnes conditions météorologiques, nous avons les graphes suivants :



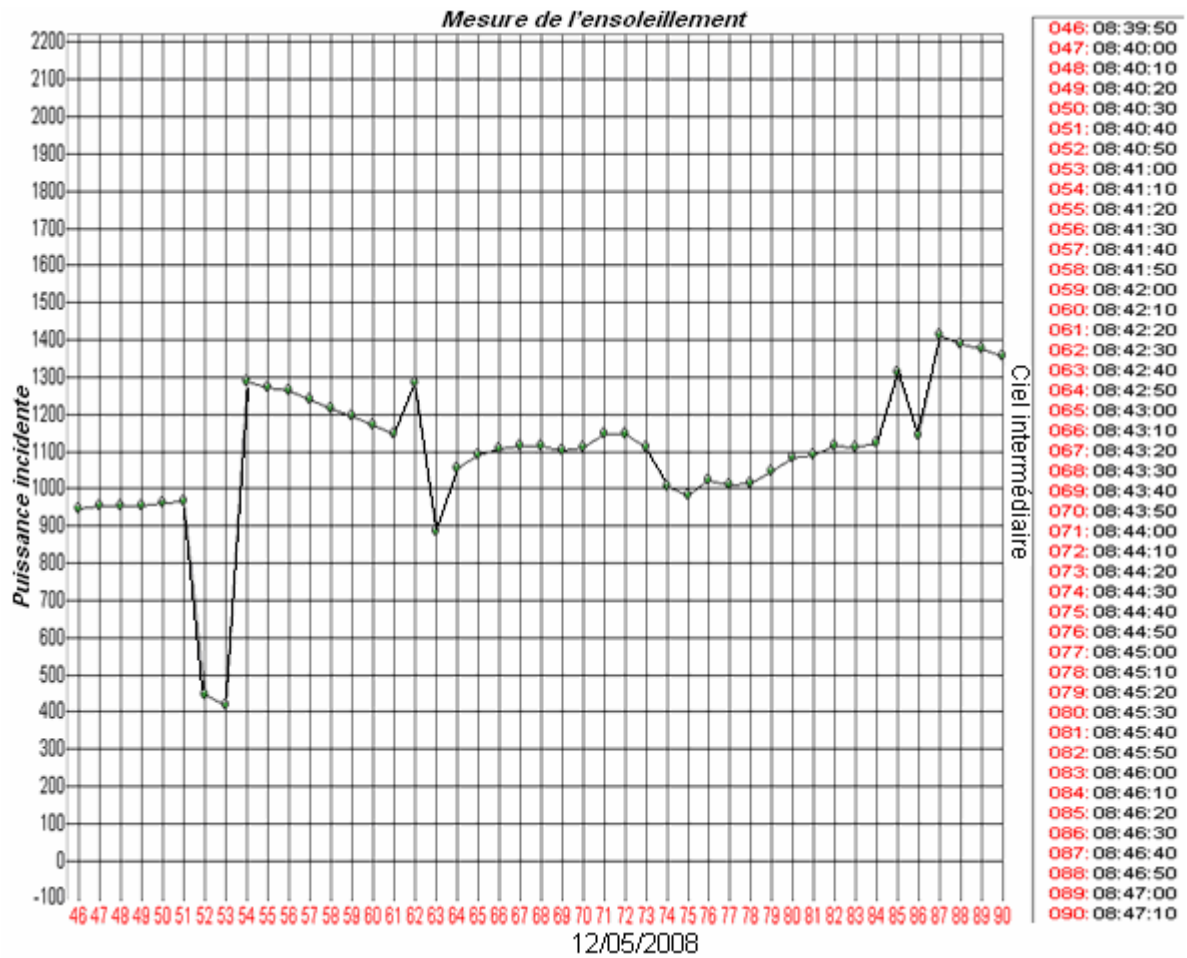


Fig. (IV.27) : L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [08:32 – 08:47]

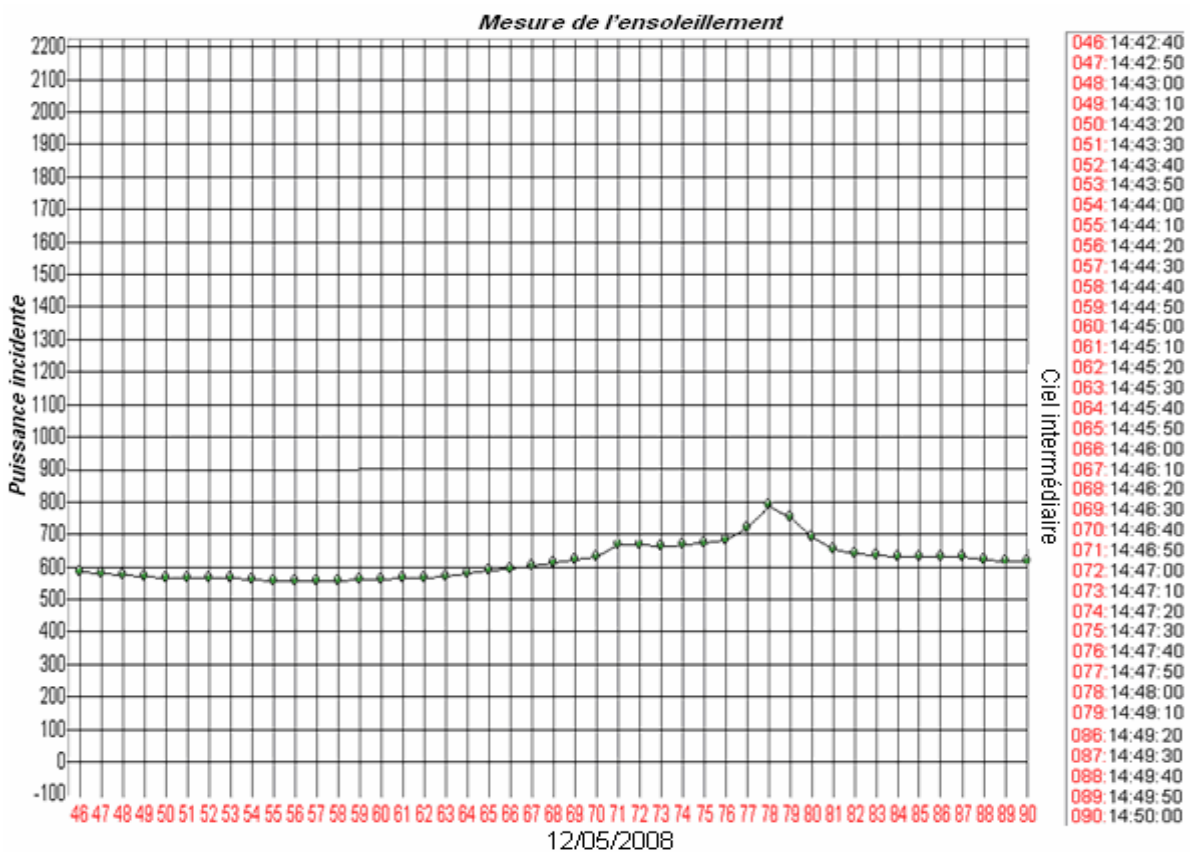
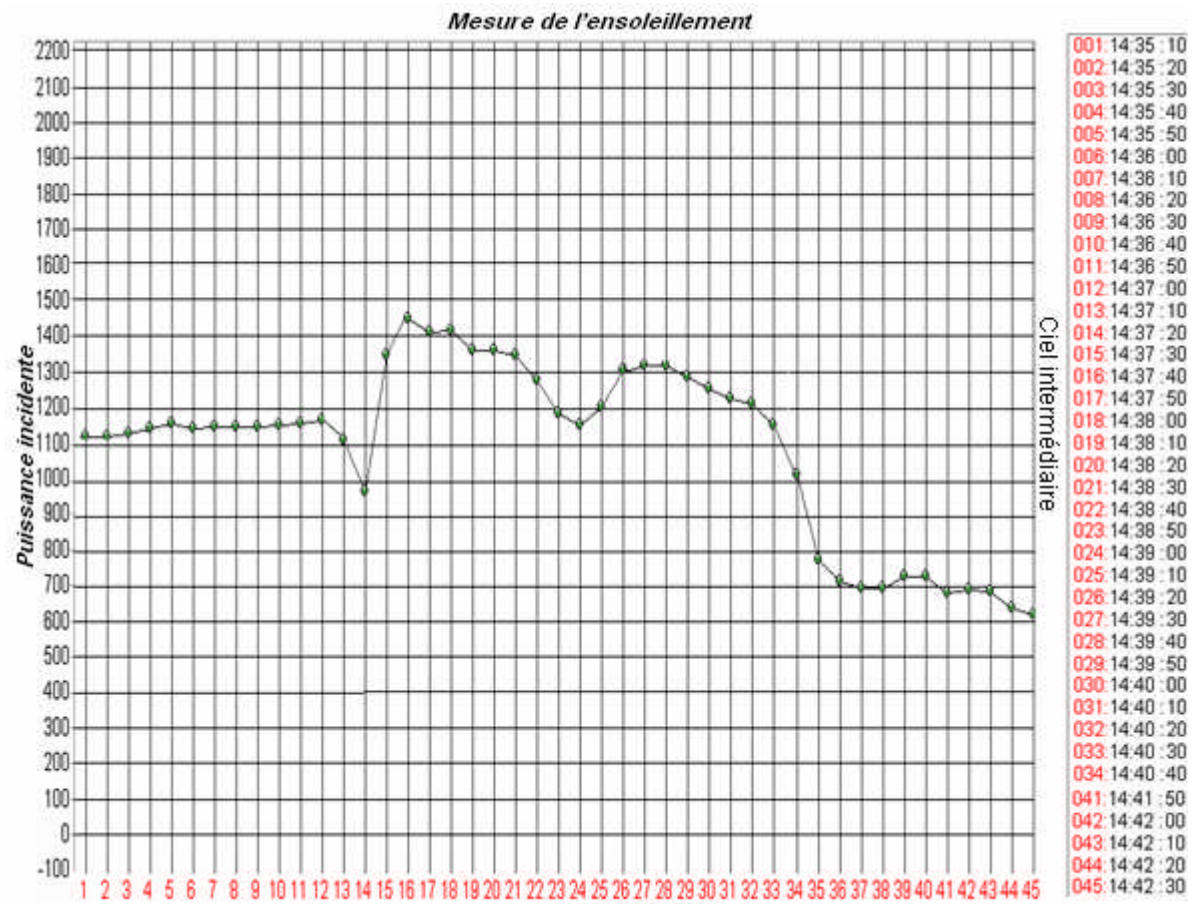


Fig. (IV.29) :L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [14:35 – 14:50]

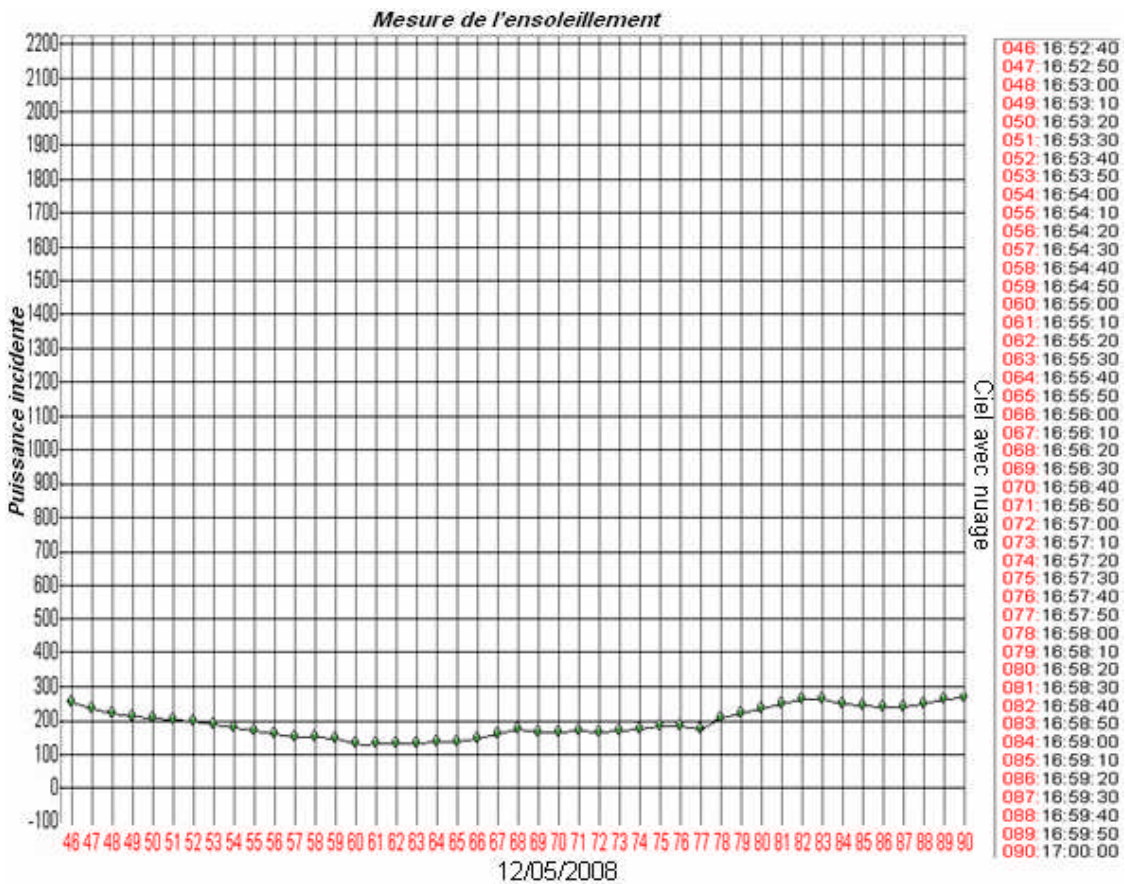
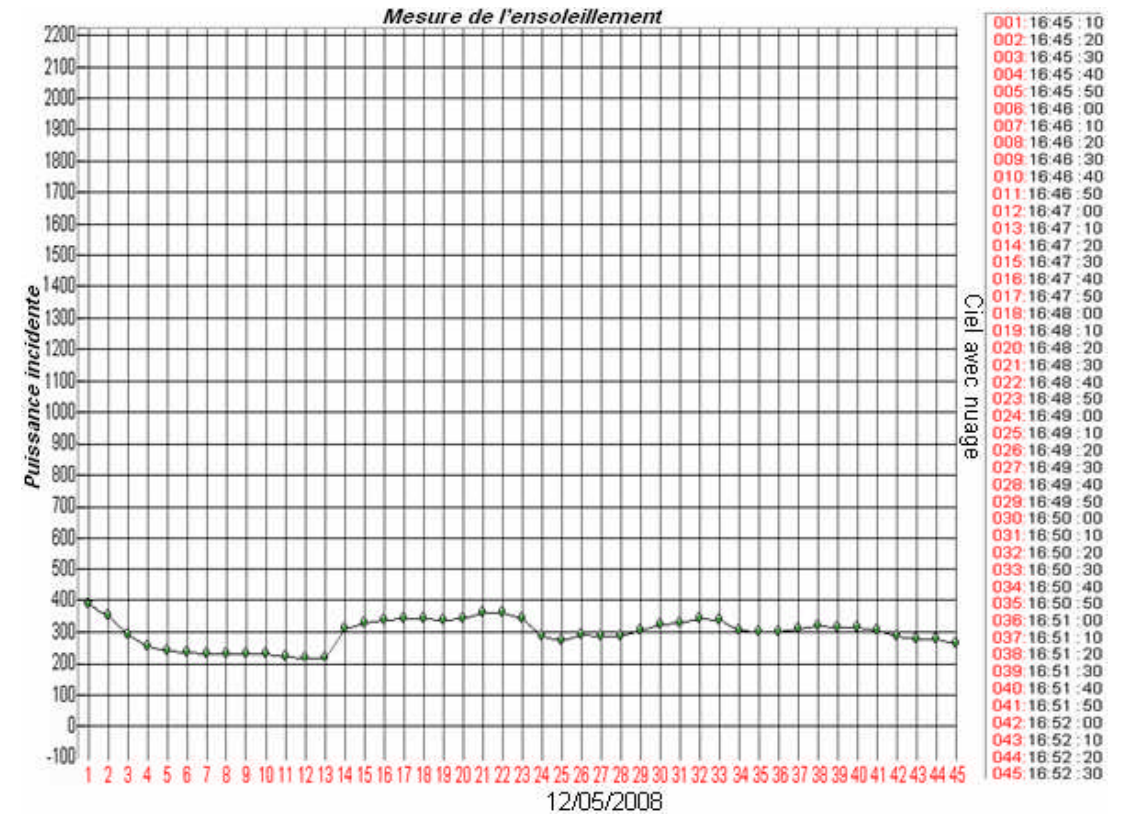


Figure. (IV.30) :L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [16:45 – 17:00]

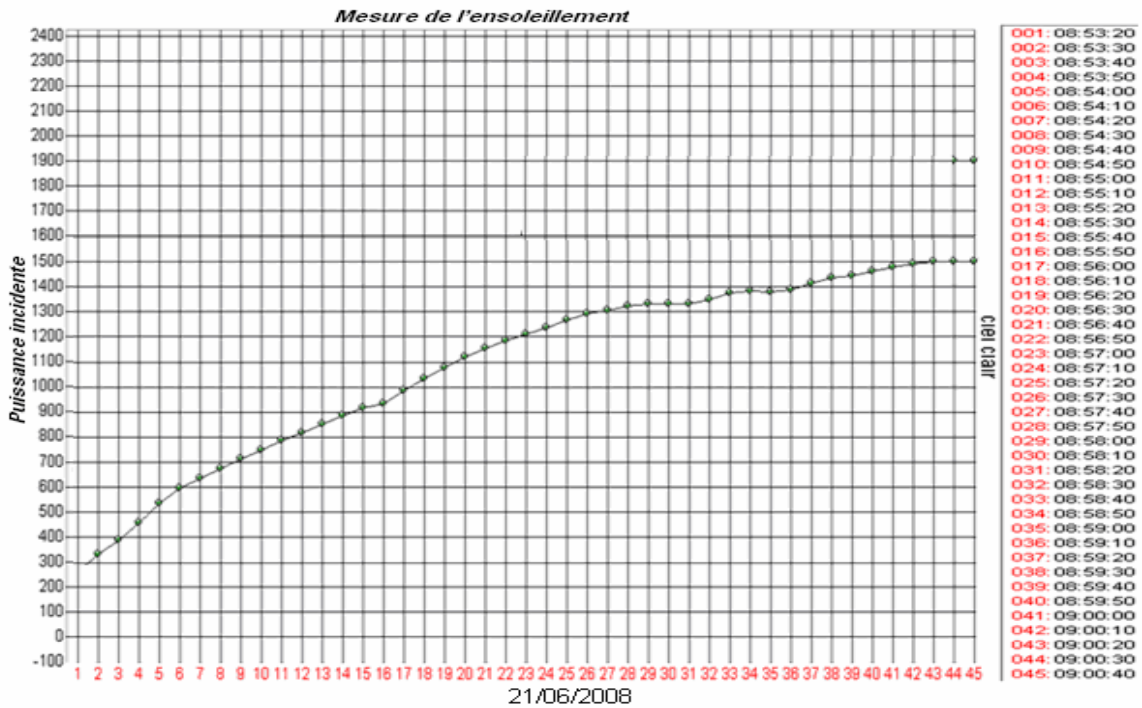
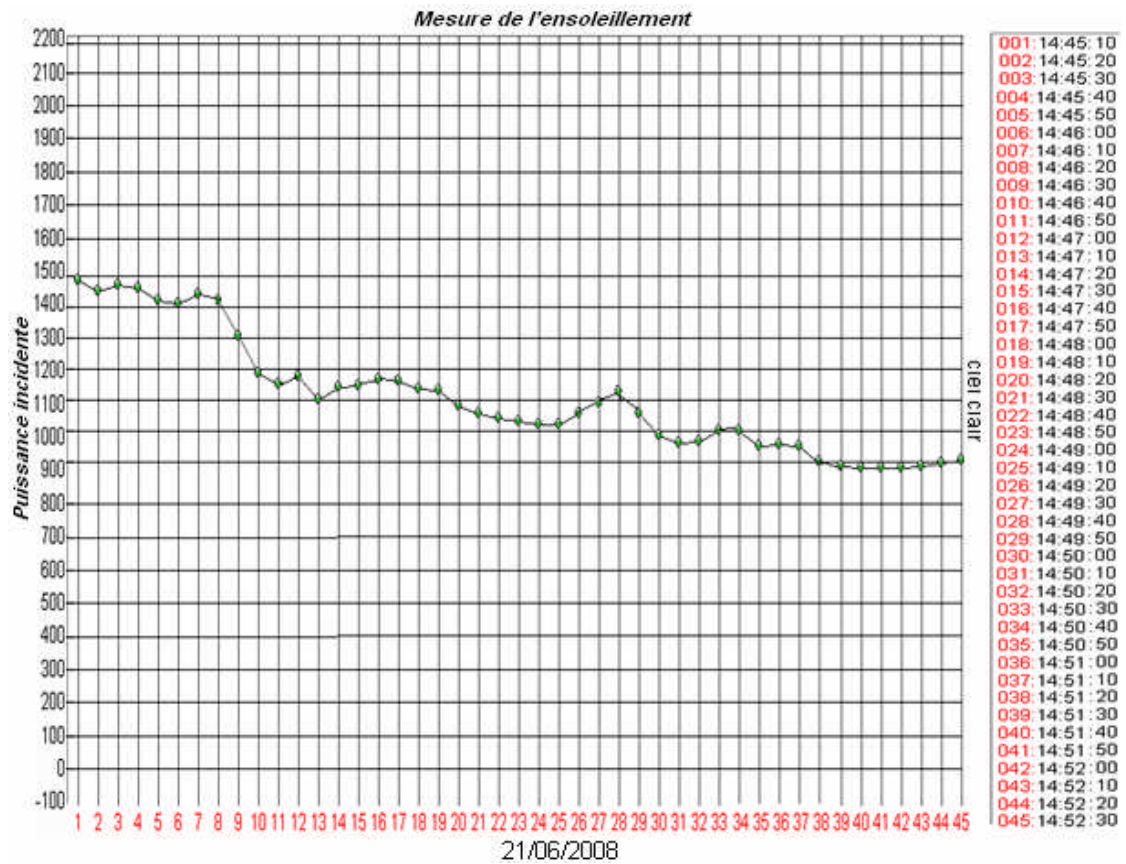


Figure. (IV.31) : L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [08:53 – 09:08]



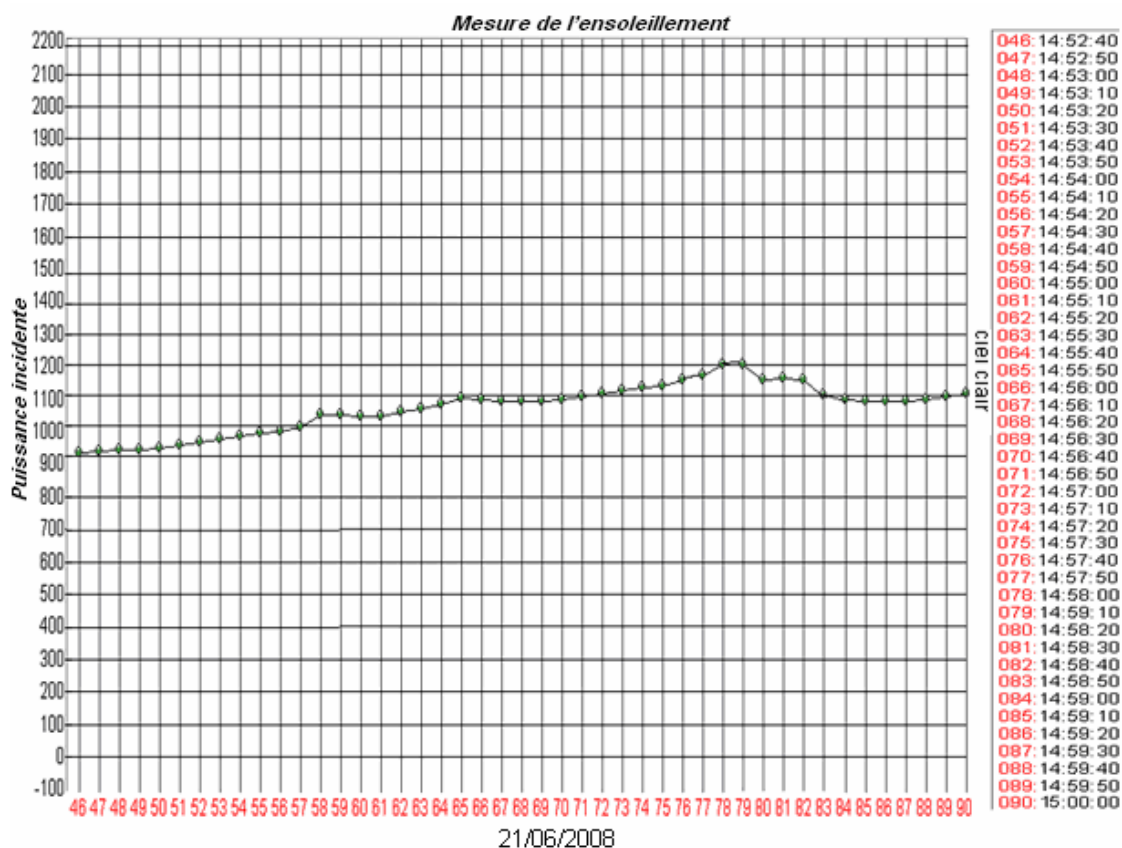


Figure. (IV.33) :L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [14:45 – 15:00]

L'heure de mesure (h)	Puissance incidente (W/m ²)
08 :00	321,68
09 :00	1243,25
10 :00	1310,19
11 :00	1240,33
12 :00	1386,15
13 :00	1384,28
14 :00	1356,10
15 :00	672,35
16 :00	384,16
17 :00	162,54

Tableau (1) : Relevé de mesures de Puissance incidente (12-05-2008)

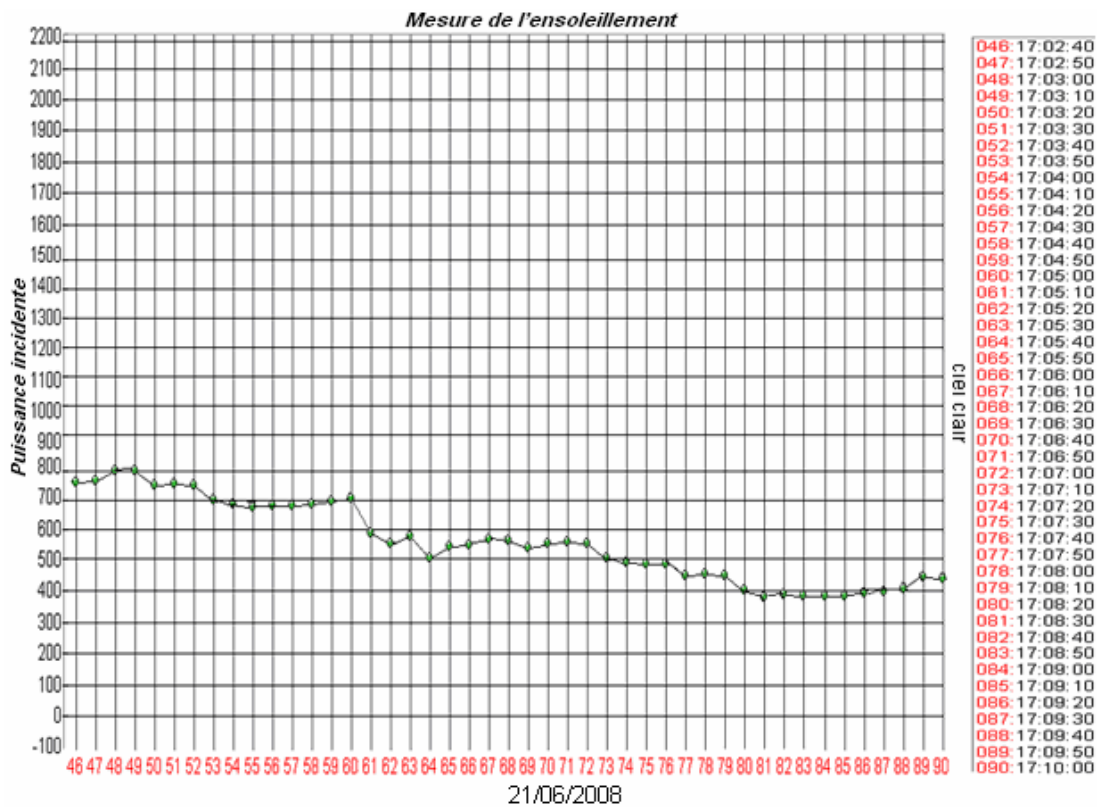


Figure. (IV.34) :L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [16:55 – 17:10]

L'heure de mesure (h)	Puissance incidente (W/m^2)
08 :00	382,37
09 :00	1353,14
10 :00	1376,79
11 :00	1451,34
12 :00	1420,64
13 :00	1486,12
14 :00	1601,96
15 :00	1107,73
16 :00	710,32
17 :00	608,17

Tableau (2) : Relevé de mesures de Puissance incidente (21-06-2008)

CONCLUSION GENERALE

Pour la conception des systèmes photovoltaïque, la donnée la plus utile concernant l'énergie solaire se traduit par les valeurs mensuelles du rayonnement globale reçu par un panneau solaire , ce dernier incliné par rapport à l'horizontal d'un angle correspondant à la latitude de lieu pour favoriser la captation de l'énergie solaire. Ainsi que les différents phénomènes qui interviennent lors de son absorption par la surface d'une cellule solaire. Ensuite nous avons présenté le schéma de base de cette dernière.

Le fonctionnement d'une cellule solaire est régit par un modèle déduit à partir d'un circuit électrique équivalent qui se traduit par une équation courant-tension $I(V)$ non linéaire .Pour la résolution nous avons utilisé la méthode de Newton Raphson. par souci de convergence et de non complexité .Cette caractéristique est influencée par plusieurs facteurs tels que la température, le flux lumineux, la résistance série et shunt .

La plupart des matériaux cristallins (CIS, Cd Te, GaAs) ont un front d'absorption raide et des longueurs d'absorption inférieures au (μm). La concentration du rayonnement solaire, en raison d'un renforcement de la génération optique, produit une augmentation de la densité de courant de court circuit.

Cette modification induit aussi la valeur de la tension de circuit ouvert légèrement supérieure à celle mesurée sous rayonnement non concentré, et l'influence de la concentration sur les paramètres de la cellule. L' étude et la simulation que nous avons mise au point ,nous a permis tenant compte de tous les paramètres influant sur le fonctionnement d'optimiser les plus sensibles . Ensuite l'étude concernera la concentration du rayonnement solaire sur des cellules de différent filière (**silicium poly , CIGS ,AlGaAs ,GaAs**) ,ainsi que l' influence de la concentration solaire sur les performances des cellules solaires .

Les résultats sont en bon accord avec la littérature et nous permettent d'envisager pour l'avenir des méthodes de préventions peu coûteuses et efficaces, telle que l'augmentation du taux de concentration produit une élévation du rendement de conversion, les filières actuelle (**AlGaAs ,GaAs**) présente une augmentation de rendement avec une taux de concentration élève à résistance série de la cellule élève .

Liste des figures

Figure (I-1) : coordonnés terrestre	5
Figure (I-2) : le mouvement de la terre autour de soleil.....	5
Figure (I-3) : les coordonnées horaires et horizontales.....	7
Figure (I-4) : le spectre solaire	8
Figure (I-5) : le rayonnement solaire et le nombre d'air masse	10
Figure (I-6) : différents composants de rayonnement	11
Figure (I-7) : Mesure le rayonnement sur une surface d'inclinaison quelconque.....	14
Figure (II-1) : Schéma explicatif du phénomène.....	17
Figure (II-2) : le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	18
Figure (II-3) : Schéma électrique d'une cellule solaire idéale.....	19
Figure (II-4) : La caractéristique I (V) d'une cellule photovoltaïque	20
Figure (II-5) : Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque	21
Figure (II-6) : Détermination graphique de la résistance série	25
Figure (II-7) : Détermination graphique de la résistance shunt.....	25
Figure (II-8) : Caractéristique I(V) et P(V) d'un module solaire.....	27
Figure (II-9) :Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque...	28
Figure (II-10) : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I (V) et P(V).....	29
Figure (II-11) : Influence de la température sur la caractéristique I (V) et P(V).....	30
Figure (II-12) :L'influence de la résistance série R_s sur la caractéristique I(V) et P(V)...	30
Figure (II-13) : L'influence de la résistance shunt R_{sh} sur la caractéristique I (V) et P(V).....	31
Figure (II-14) : L'influence de facteur de qualité A sur la caractéristique I (V) et P(V).....	32
Figure (II-15) : Groupement des cellules en série	32
Figure (II-16) : Caractéristique de nombre des modules en série.....	33
Figure (II-17) : Groupement des cellules en parallèle.....	33
Figure (II-18) : Caractéristique de nombre des modules en parallèles.....	34
Figure (II-19) : Groupement des cellules mixte.....	34
Figure (II-20) : Caractéristique de nombre des modules en série et en parallèle.....	35
Figure (II-21) : Répartition de la production photovoltaïque mondial des différents filières.....	35
Figure (II-22) : schéma simplifié d'une cellule organique.....	39
Figure (III-1) : coefficient d'absorption optique de divers semi-conducteurs.....	41
Figure (III-) : Systèmes à réflecteur cylindro –parabolique.....	43
Figure (III-) : Systèmes à réflecteur –parabolique.....	43
Figure (III-) : Lentille de Fresnel.....	44
Figure (III-) : Lentille circulaire.....	45
Figure (III-) : Lentille rectangulaire.....	45
Figure (III-) : Influence des imprécisions de fabrication.....	47
Figure (III-) : la variation de rendement de conversion avec la concentration pour différentes valeurs de la résistance série.....	48
Figure (IV -1) :Caractéristique I(V)des cellules solaires et p(V).....	51
Figure (IV -2) : l'influence de l'éclairement sur la Caractéristique I(V) et P(V).....	51
Figure (IV -3) : l'influence de la température sur la Caractéristique I(V) et P(V).....	52

Figure (IV -4) : l'influence de la résistance série sur la Caractéristique I (V) et P (V).....	52
Figure (IV -5) : l'influence de la résistance parallèle sur la Caractéristique I (V) et P (V).....	53
Figure (IV -6) : l'influence de la concentration solaire sur la Caractéristique I (V) au Si poly...	54
Figure (IV -7) l'influence de la concentration solaire sur la Caractéristique I (V) au GaAs....	55
Figure (IV -8) : l'influence de la concentration solaire sur la Caractéristique I (V) au AlGaAs.....	55
Figure (IV -9) : l'influence de la concentration solaire sur la Caractéristique I (V) au CIGS....	56
Figure (IV -10) : l'influence de la concentration solaire sur la tension V_{oc} au AlGaAs.....	56
Figure (IV -11) : l'influence de la concentration solaire sur la tension V_{oc} de cellule au Si poly.	57
Figure (IV -12) : l'influence de la concentration solaire sur la tension V_{oc} de cellule au CIGS..	57
Figure (IV -13) : l'influence de la concentration solaire sur la tension V_{oc} de cellule au GaAs.....	58
Figure (IV -14) : l'influence de la concentration solaire sur le rendement de cellule au Silicium poly....	59
Figure (IV -15) : l'influence de la concentration solaire sur le rendement de cellule au CIGS	59
Figure (IV -16) : l'influence de la concentration solaire sur le rendement de cellule au AlGaAs	60
Figure (IV -17) : l'influence de la concentration solaire sur le rendement de cellule au GaAs	60
Figure (IV -18) : La variation du rendement de conversion de cellule au CIGS pour les fortes concentrations	61
Figure (IV -19) : La variation du rendement de conversion de cellule au AlGaAs pour les fortes concentrations	61
Figure (IV -20) : La variation du rendement de conversion de cellule au GaAs pour les fortes concentrations.....	62
Figure (IV -21) : La variation du rendement de conversion de cellule au Silicium poly pour les fortes concentrations.....	62
Figure (IV -22) : le pyranomètre.....	66
Figure (IV -23) : intégrateur solaire.....	66
Figure (IV -24) : intégrateur solaire.....	66
Figure(IV -25): mesure de l'ensoleillement par l'utilisation d'un Pyranometre, Intégrateur Ordinateur.....	67
Figure (IV -26) : L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [08:32 – 08:47].....	69
Figure (IV -27) : L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [12:19 – 12:34].....	70
Figure (IV -28) : L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [14:35 – 14:50].....	71
Figure (IV -29) : L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [16:45 – 17:00].....	72
Figure (IV -30) : L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [12:25 – 12:40].....	74
Figure (IV -31) : L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [14:45 – 15:00].....	75
Figure (IV -32) : L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [16:55 – 17:10].....	77

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Unité	Définition
h	j.s	Constante de Planck
ν	Hz	Fréquence de l'onde lumineuse
E	eV	Quantité d'énergie
c	m/s	vitesse de lumière
Z	km	altitude
D_{TS}	UA	distance terre- soleil
J	jour	numéro du jour de l'année
λ		Longitude du lieu
φ		Latitude du lieu
δ		Déclinaison du soleil
H		Angle horaire du soleil
h	(°)	hauteur du soleil
a		Azimut du soleil
γ		La hauteur du capteur
α		Azimut du capteur
β		Angle d'inclinaison
<i>i</i>		angle d'incidence
I		rayonnement direct
I_h		rayonnement direct horizontal
D	W/m ²	rayonnement diffus
D_h		rayonnement diffus horizontal
G_h		rayonnement global horizontal
G		rayonnement global
Alb	-	albédo du sol
I_{ph}	A	photo- courant.
I_d		courant traversant la diode
E_g	eV	Energie de la bande interdite
q	$1,6.10^{-19}$ coul	charge de l'électron
k	J/k	la constante de boltzman.
I_s	A	courant de saturation.
I		Courant de la cellule
U_T	V	tension thermique.
V		tension à la borne de la cellule.
T	°K	température absolue.
T_a		Température ambiante
R_s	Ω	résistance série
R_{sh}		résistance shunt
I_{cc}	A	Courant de court-circuit
V_{co}	V	Tension à circuit ouvert
A	-	Facteur de qualité
I_{max}	A	Courant de la puissance maximale
V_{max}	V	Tension de la puissance maximale
P_{max}	W	puissance maximale

ff	%	Facteur de forme
P_{incident}	W	puissance du rayonnement solaire incident
η_c	%	Rendement d'une cellule solaire
E	W/m^2	Eclairement
E_r		Eclairement de référence
N_s	-	Nombre des modules solaires en série
N_p	-	Nombre des modules solaires en parallèle.
X_t	-	précision sur l'angle du rayon réfracté
X_R	-	précision sur l'angle du rayon réfléchi
η	-	le rendement optique
X_{th}	-	le taux de concentration théorique
X	-	Le taux de concentration
	-	Le taux de concentration

Résumé :

L'utilisation des énergies renouvelables connaît une croissance significative dans le monde. Dans notre pays. Devant la demande croissante d'énergie électrique essentiellement pour les besoins des régions éloignées, désertes, et montagneuses.

Ce travail intitulé << Etude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïques >> peut être résumé dans les points suivants :

Tous d'abord, nous avons présenté la nature du rayonnement solaire arrivant à la surface de la terre, ainsi que les influences diminuant l'intensité des rayons du soleil.

Notre deuxième préoccupation a été d'étudier la physique de la cellule photovoltaïque, puis de rappeler le principe de fonctionnement d'une photopile et du générateur solaire, et enfin d'étudier les principales filières utilisées pour les cellules solaires.

Dans une troisième étape, nous avons présenté l'étude de la concentration de rayonnement solaire et l'influence de la concentration sur les paramètres de la cellule.

Dans un quatrième lieu, nous avons présenté le fonctionnement d'une cellule solaire sous forme d'un modèle mathématique qui débouche à la caractéristique courant-tension $I(V)$, cette dernière se présente sous forme d'une équation non linéaire nécessitant une résolution numérique <Méthode de Newton Raphson>. La caractéristique courant-tension est influencée par plusieurs facteurs tels que : la température, le flux lumineux, la résistance shunt, et la résistance série. Ensuite l'étude concernera la concentration du rayonnement solaire sur des cellules de différentes filières (**silicium poly, CIGS, AlGaAs, GaAs**), ainsi l'influence de la concentration solaire sur les performances des cellules solaires.

Les résultats sont en bon accord avec la littérature et nous permettent d'envisager pour l'avenir des méthodes de préventions peu coûteuses et efficaces, telle que l'augmentation du taux de concentration produit une élévation du rendement de conversion, la filière actuelle (**AlGaAs, GaAs**) présente une augmentation de rendement avec un taux de concentration élevé à résistance série de la cellule élevée.

Nous avons aimé faire une étude expérimentale pour estimer notre résultat ; nous avons fait une mesure de puissance incidente sous l'effet de l'éclairement. On a présenté les caractéristiques $I(V)$ des courbes expérimentaux.

Mots clés :

Energie Solaire Photovoltaïque, concentration, cellule silicium poly, CIGS, GaAs, AlGaAs.

ملخص:

الطاقة الشمسية متوفرة على كافة أنحاء الكرة الأرضية وهي متجددة، نسبتها مختلفة على حسب الأيام والفصول ولكن يمكن التنبؤ بها نسبيا. أنضمة الطاقة الشمسية لا تحتاج إلى أي وقود، بالإضافة إلى أن مولداتها لا تحتوي على أي قطعة متحركة، وبالتالي فهي لا تحتاج عمليا إلى صيانة، وبذلك تكون تكاليف العناية بها ضئيلة نسبيا. هذه الخصائص جعلت استعمالات الطاقة الشمسية خاصة بالمناطق النائية حيث الكثافة السكانية قليلة والطلب إلى الطاقة ضعيف.

في هذا العمل قمنا بدراسة تركيز أشعة الشمس على خصائص بعض الخلايا الضوئية.

ففي البداية قمنا بعرض طبيعة أشعة الشمس التي تصل إلى سطح الأرض ثم إلى دراسة الخلايا الضوئية مع توضيح مبادئ التشغيل الخاصة بها وأهم أنواعها حسب المواد المستعملة في صناعتها , ثم قمنا بدراسة تركيز الأشعة الشمسية و تأثيرها على مميزات الخلايا الضوئية .

و في الأخير قمنا بعرض مبدأ التشغيل بالنسبة لخلية الضوئية على شكل نموذج رياضي ممثل بالخاصية المميزة تيار – توتر هذه الأخيرة مثلت على شكل معادلة لاقطية والتي يستوجب حلها برنامج ألي يعتمد على طريقة نيوتن- رافسن حيث ان الخاصية المميزة تيار – توتر تتأثر بعدة عوامل منها : الحرارة، تدفق الأشعة الشمسية، المقاومة المربوطة على التوازي، المقاومة المربوطة على التسلسل , وبعد ذلك تم التطرق إلى دراسة تركيز الاشعة الشمسية على اربعة انواع : بولي سيلسيوم , AlGaAs , GaAs , CIGS . من الخلايا

ففي حالة زيادة تركيز الاشعة الشمسية ينتج عنها زيادة في مردود الخلية الضوئية بالنسبة لكل نوع الا ان هذه في تنقل ص عدالزي ا حالة زيادة كبيرة لتركيز الاشعة الشمسية .