

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

UNIVERSITE DE MENTOURI CONSTANTINE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

THESE

**Présenté pour l'obtenir
du Diplôme de Magistère en Electronique
Option
INSTRUMENTATION**

Par

BENIS HALOUMA

INTITULE

**Contribution à la modélisation du
problème de
« Hot Spot » dans les modules solaire
Photovoltaïque occultés**

Devant le jury :

**Président : MARIR B.E
Rapporteur : MARIR –BENABBAS M
Examineurs : AZIZI C
KAABI A**

**Pr. Unv.Constantine
Pr . Unv.Constantine
Pr . Unv.O.Emboughi
Pr . Unv.Constantine**

2008

SOMMAIRE

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I LE GISEMENT SOLAIRE

INTRODUCTION GENERALE

Introduction	1
I- Définition générale	1
<i>I-1- Le rayonnement solaire</i>	<i>1</i>
<i>I-1-1- Soleil</i>	<i>1</i>
<i>I-1-2- Caractéristique de rayonnement solaire</i>	<i>1</i>
<i>a)-L'atmosphère</i>	<i>1</i>
<i>b)-Masse d'air</i>	<i>2</i>
<i>I-2-1- Longitude</i>	<i>3</i>
<i>I-2-Coordonnées terrestres</i>	<i>3</i>
<i>I-2-2-La latitude</i>	<i>4</i>
<i>I-2-3-L'altitude</i>	<i>4</i>
<i>I-3-Rappels de quelques éléments de géométrie</i>	<i>4</i>
<i>I-3-1-Les coordonnées horaires</i>	<i>5</i>
<i>I-3-2-Les coordonnées horizontales</i>	<i>5</i>
<i>I-3-3-La déclinaison du Soleil</i>	<i>5</i>
II-Différents types de rayonnement	6
<i>II-1-Le rayonnement direct</i>	<i>6</i>
<i>II-2-Le rayonnement diffus</i>	<i>6</i>
<i>II-3-L'albédo</i>	<i>7</i>
<i>II-4-Le rayonnement global</i>	<i>7</i>
III-Quelques grandeurs photométriques	7

<i>III-1-Le Flux</i>	7
<i>III-2-L'intensité Lumineuse</i>	8
<i>III-3-L'éclairement</i>	8
<i>III-4-L'exposition</i>	8
<i>III-5-La Luminance</i>	8
IV-Conclusion	9
CHAPITRE II LE GENERTATEUR PHOTOVOLTAIQUE	
I- Introduction	10
II-Le générateur photovoltaïque	10
<i>II-1-Principe</i>	11
<i>II-1-1-Module</i>	12
<i>II-1-2- Panneau</i>	13
<i>II-2- Caractéristique électriques d'une cellule photovoltaïque</i>	13
<i>II-3-Circuit équivalent d'une cellule solaire</i>	14
<i>II-3-1- Cas d'une cellule idéale</i>	14
<i>II-3-2-Cas d'une cellule photovoltaïque réelle</i>	15
<i>II-4- Influence de la résistance série</i>	17
<i>II-5-Influence de la résistance shunt</i>	18
<i>II-6- Méthode de détermination de la résistance série</i>	19
<i>II-7-Détermination de la résistance shunt</i>	21
III-Connexions série, connections parallèle, pour des cellules identiques	22
<i>III-1-Connections séries</i>	22
<i>III-2-Connections parallèle</i>	23
IV-Occultation d'une cellule	25

IV-1-Problème thermique	27
IV-1-1-Puissance dissipée maximale dans un module	27
V- Connexions série, Connexions parallèle, pour des cellules non identiques ...	28
V-1- Connexions série	28
V-2- Connexions parallèle	31
VI-Diodes de Protection	34
VI-1-Protection par des diodes dans un groupement série	34
VI-2-Protection par des diodes dans un groupement parallèle	35
VII-Conclusion	36
CHAPITRE III LES APPROCHES DE CALCULES DE LA CARACTERISTIQUE I (V) D'UNE CELLULE SOLAIRE	
I-Introduction	37
I-1-La méthode numérique utilisée pour résoudre l'équation de caractéristique I (V)	37
I-2-Méthode des points fixes	37
I-3-Méthode de Newton	38
I-4- La méthode de bisection	38
II-L'importance de la résistance shunt dans le problème de « hot spot »	40
II-1-L'influence de la résistance shunt et de l'occultation sur la courbe I (V)	40
III-Puissance dissipée dans la cellule occultée	45
IV-Occultation de plusieurs cellules	47
V- La révision de modèle de cellule solaire à la polarisation inverse	48
V- 1- la courbe I (V)	48
V- 2-Puissance dissipée	48
V-2-1- Les cellules de type A	49
V-2-2- Les cellules de type B	49
V-3-Interconnexions considérables	49
V-3-1-Connexion série parallèle	50
V-3-2-Connexion parallèle série	52

VI-Résolution de l'équation non linéaire I (V)	54
VI-1-L'influence de l'occultation sur la puissance dissipée	55
Conclusion	56

CHAPITRE IV ETUDE DES COURBES ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Introduction	57
I- Organigramme	57
II-Résultats	59
II-2-L'influence de la résistance R_{sh}	60
II-3-L'influence de taux d'occultation F	61
II-4-La puissance dissipée	62
II-4-1-L'influence de l'occultation sur la puissance dissipée	62
II-4-2-L'influence la résistance shunt sur la puissance dissipée	64
II-4-3-L'influence de nombre de cellule occultée sur la puissance dissipée	65
II-4-4 : La puissance dissipée maximale	66
III-Conclusion	67
IV-Etude expérimentale	69

CONCLUSION GENERALE

*INTRODUCTION
GENERALE*

Introduction générale

A la suite des crises de pétrole, une croissance de la demande énergétique dans le monde a largement stimulé la recherche des nouvelles sources de remplacement tel que l'énergie solaire. Les avantages de cette source sont, inépuisable, non polluante, propre, une haute fiabilité, et offre une grande sécurité d'utilisation.

La cellule solaire est l'élément de base pour la conversion d'énergie solaire en électricité, le meilleur rendement de cette conversion est obtenu pour un groupement de plusieurs cellules en parallèle ou en série. Seulement ce groupement demande des précautions particulières pour éviter de provoquer la dégradation du module.

Lorsqu'un module photovoltaïque est partiellement ensoleillé (ombre, salissures non uniformes)..., ayant subi des dommages mécaniques (vandalisme, crackage durant l'assemblage) ou bien présentant des dispersions dans les paramètres des cellules, certaines cellules se transforment en résistance et s'échauffent, par suite une dissipation d'une puissance considérable résulte et dégrade les caractéristiques du module, induisant même des pannes importantes. Ce phénomène est connu dans l'industrie des systèmes solaires sous le nom de « hot spot » ou « points chauds ».

Ce problème s'est posé pour la première fois dans l'application des modules photovoltaïques sur les satellites. Il apparut également dans les applications terrestres utilisant de grandes puissances. La première publication sur ce sujet a été faite par Blake et Hanson en 1969. D'autres résultats remontent à (1971) par Rauschenbach, M. Sayed et Partain en (1973), ils ont remarqué dans l'analyse de l'effet de l'occultation sur les cellules polarisées en inverse que l'effet de « hot spot » ne causait pas seulement des hautes températures, mais provoquait aussi des pannes permanentes et des pertes de puissance considérables.

Notre travail concerne essentiellement la contribution à la modélisation du problème de « hot spot » dans les modules solaires photovoltaïques occultés, il est réparti en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à l'étude des notions sur le gisement solaire ; les caractéristiques du rayonnement solaire et leurs différents types ainsi que 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 courant tension de la cellule solaire, les différentes configurations, la deuxième partie de chapitre consacré à l'étude des problèmes des déséquilibres des cellules sous différentes configurations et différentes méthodes de protection par diodes.
- Quant au troisième chapitre, il est orienté à l'étude des différentes approches de calculs de la caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire d'une part et d'autre part à l'étude de nouveau modèle de calcul proposé de la caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire sous occultation dans un module solaire .
- Le quatrième chapitre est réservé à la discussion et l'interprétation des résultats obtenues.

CHAPITRE I
GISEMENT SOLAIRE
PHOTOVOLTAIQUE

Introduction

Comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire à l'étude des systèmes photovoltaïques, surtout dans une optique de développement des marchés et des technologies. Par gisement solaire, on entend ici les différentes caractéristiques du rayonnement solaire, susceptibles d'influencer les performances d'un système en un lieu donné. Dans un premier temps, on rappellera quelques données de base concernant le rayonnement solaire, indispensables tant au chercheur qu'à l'ingénieur : distributions des types d'éclairement, irradiances moyennes et maximales sur divers plans, distribution spectrale moyenne... Les applications photovoltaïques requièrent des présentations spécifiques des données de rayonnement, qui peuvent être différentes selon le niveau de détail des études envisagées, mais aussi selon le système projeté (selon qu'il est, par exemple, autonome ou relié au réseau). [1]

I- Définition générale :

I-1- Le rayonnement solaire :

I-1-1- Soleil :

Le soleil est une étoile de forme pseudo sphérique dont le diamètre atteint 1 391 000km. Il est situé à une distance moyenne de $1,49675 \cdot 10^8$ km de la terre .composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, il est le siège de réaction de fusion nucléaire permanente et sa température de cœur atteint 10^7 K. [2]

I-1-2- Caractéristique de rayonnement solaire :

a)-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 poussières des cendres, des micros cristaux, des micros gouttelette, des fumées de pollution industrielle dont la taille varie de 0.5 à 10 μ m.) ainsi la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge. [3]

b)-Masse d'air :

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus son rayonnement est modifié.

On appelle « masse d'air », m , la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement directe pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversé vertical au niveau de la mer (voir figure (I-1)). Cela dépend de la hauteur angulaire du soleil (h) .à l'aide des points O, A et M, on écrit la longueur du trajet du soleil travers l'atmosphère :

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (I-1)$$

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

A une pression p différente de 1013 mbar et à altitude z (km), on désignera par masse atmosphérique ou nombre d'air masse le nombre: [3]

$$m = \frac{p}{1013 \times \sin h} \exp\left(-\frac{z}{7.8}\right). \quad (I-2)$$

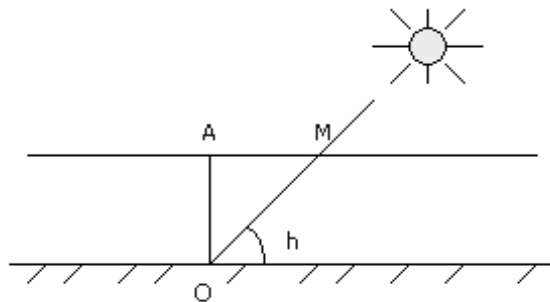


Figure (I-1) : le rayonnement solaire et le nombre d'air masse [4]

Exemple :

- ✓ Soleil au zénith (au niveau de la mer) on obtient les conditions : AM_1 ($m = 1/\sin 90^\circ = 1$)
- ✓ Avec un soleil à 30° sur l'horizon, on obtient les conditions : AM_2 ($m = 1/\sin 30^\circ$)
- ✓ par convention AM_0 , désigne le rayonnement solaire hors atmosphère. [4]

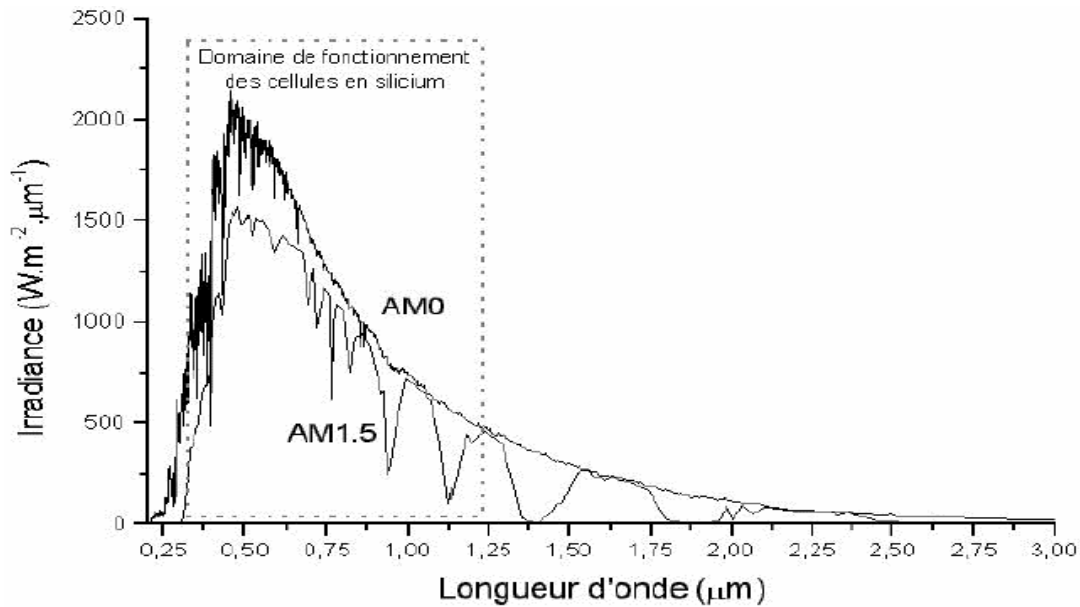


Figure (I-2) : Représentation graphique des spectres AM0, AM1, 5

I-2-Coordonnées terrestres :

Tout point de la surface terrestre est repérée par ces coordonnées géographiques :

Longitude, latitude, ainsi que par son altitude. Voir figure (I-3). [5]

I-2-1-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. [5]

Pour Constantine la longitude est de : 42°3'.

I-2-2-La latitude :

C'est l'angle entre l'équateur et le rayon de la terre qui passé par le lieu considéré. Pour la ville de Constantine la latitude est environ de 36°.

I-2-3-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. [5]

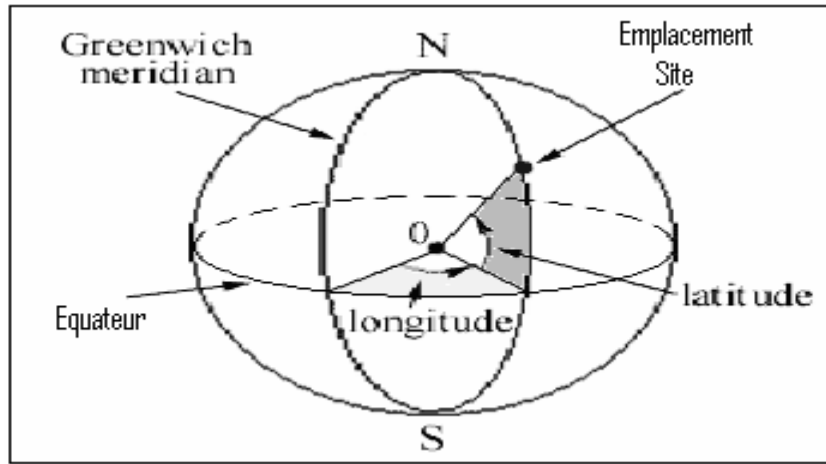


Figure (I-3) : coordonnées terrestre [4]

I-3-Rappels de quelques éléments de géométrie:

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-4) [4]

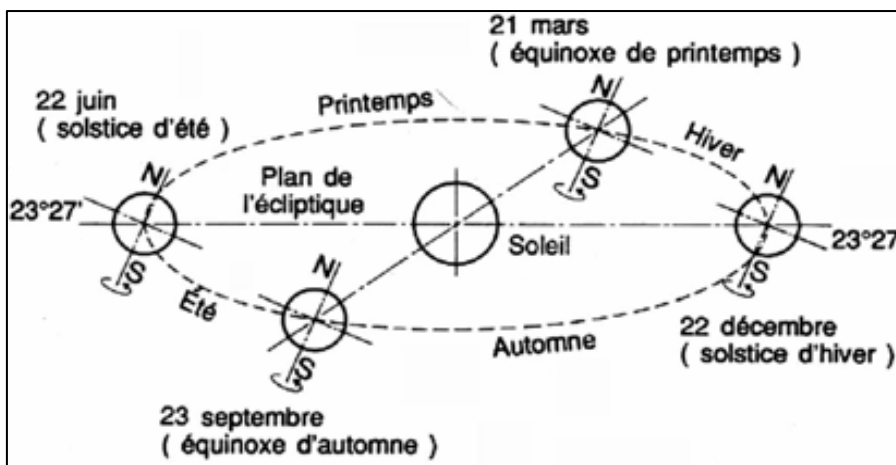


Figure (I-4) : le mouvement de la terre autour de soleil [4]

I-3-1-les coordonnées horaires :

Les *coordonnées horaires* dont le repère est donné 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-5) [4]

I-3-2-les coordonnées horizontales :

Les *coordonnées horizontales* dont le repère est donné 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-5). [4]

I-3-3-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 :

$$\delta = 23.45 \sin(0.986J - 80^{\circ}) \quad (\text{I-3})$$

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). [4]

$$\omega = 15(t - 12) \quad (\text{I-4})$$

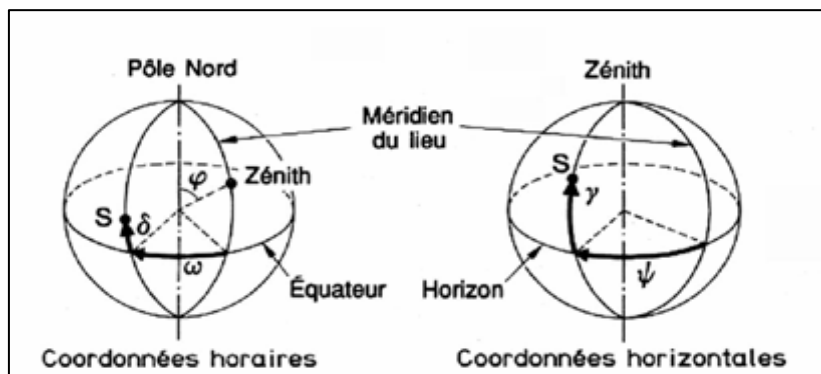


Figure (I-5) : les coordonnées horaires et horizontales [4]

II-Différents types de rayonnement :

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes : [3,6]

II-1-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. [3,6]

II-2-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-6).

La conversion photovoltaïque utilisant les modules utilise aussi bien le rayonnement direct que le rayonnement diffus. [3,6]

II-3-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 réflectance pour le rayonnement considérée et pour tous les angles d'incidences possible. Par définition, le corps noir possède un albédo nul. [3][6]

II-4-Le rayonnement global :

C'est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure ci-dessous. [3][6]

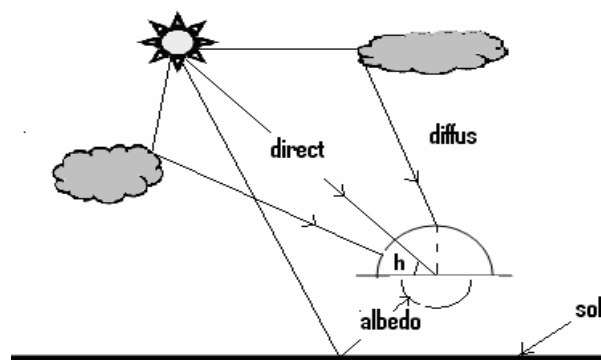


Figure (I-6) : différents composants de rayonnement [4]

III-Quelques grandeurs photométriques :

III-1-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). [8]

III-2-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. [8]

III-3-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 : [8]

$$E = \frac{d\phi}{ds} \quad (I-5)$$

E est en W/m².

III-4-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 : [8]

$$H = \int E dt \quad (I-6)$$

H est donc en J.m².

III-5-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. [8] $L = \frac{dI}{(dS \cos A)}$ (I-7)

Conclusion :

Cette étude théorique concernant le gisement .nous avons rappelé des définitions générales sur le rayonnement solaire (caractéristique des rayonnements solaires, les coordonnées terrestres) et nous avons aussi rappelé quelques éléments de géométrie, les différents types de rayonnement.

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

CHAPITRE II

***GENERATEUR
PHOTOVOLAIQUE***

Introduction :

L'énergie solaire transformée par les panneaux solaires est proportionnelle à la surface de captation. Pour obtenir une tension facilement utilisable les photopiles doivent être connectées en série ou séries parallèles [8]. Il est extrêmement important d'éviter la détérioration ou la dispersion des paramètres durant l'assemblage.

La cellule solaire aux performances électriques les plus faibles impose son courant de court-circuit dans le montage série et sa tension de circuit ouvert dans le montage parallèle. Dans les conditions de court circuit, lorsqu'une cellule est défectueuse la tension à ses bornes s'inverse elle devient égale et opposée à la tension des autres cellules en série. Cette dernière va constituer une charge par rapport aux autres cellules et va être le siège d'une dissipation thermique relativement élevée constituant ce qu'on appelle communément le phénomène de points chauds [9]

Pour limiter la dissipation de puissance il existe de nombreuses solutions, la première consiste à placer des diodes de protection de polarisation inverse, en parallèle sur chaque photopile, cette solution pose des problèmes lors de l'encapsulation [8].

La protection des photopiles contre les tensions inverse trop importante par la délimitation numérique d'une zone de contrainte thermique. En pratique la pénétration dans cette zone est d'autant plus préjudiciable à la durée de vie du module qu'elle est profonde et prolongée. Une autre méthode a le même principe que les premiers, excepté le fait que la diode polarisée en inverse est intégrée dans la cellule solaire durant sa fabrication. Cette méthode est très efficace mais relativement coûteuse car elle introduit des étapes supplémentaires lors de la conception. [10]

II-Le générateur photovoltaïque :

II-1-Principe :

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. [11]

L'élément de base du générateur photovoltaïque est la cellule solaire seule et non pas le module ou le panneau.

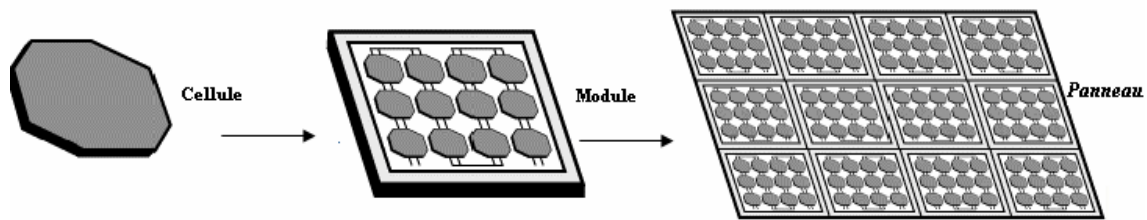


Figure (II-1) : Association des cellules solaires photovoltaïques [12]

La description du générateur photovoltaïque nécessite donc la présentation de la cellule solaire.

Lorsqu'un semi-conducteur de type n est mis en contact avec un semi-conducteur de type p, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p devient chargée négativement. Il se crée donc un champ électrique entre les zones n et p, qui tend à repousser les électrons dans la zone n et un équilibre s'établit.

Une jonction a été créée, et en ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, c'est une diode qui est obtenue.

Lorsque cette diode est éclairée, les photons sont absorbés par le matériau et chaque photon donne naissance à un électron et un trou. La jonction de la diode sépare les électrons et les trous donnant naissance à une différence de potentiel entre les contacts n et p et un courant circule si une résistance est placée entre les contacts de la diode. [13]

Dans les conditions de flux et de température constants, la cellule n'impose ni une tension de fonctionnement ni un courant [14]. Le point de fonctionnement sera fixé par la charge.

La figure (II-2) montre la caractéristique complète (dans les trois quadrants) d'une photodiode sous illumination.

Le quadrant 1 correspond au fonctionnement en générateur avec $I > 0$ et $V > 0$.

Si la tension de la cellule est en raison du circuit extérieur, amenée à dépasser V_{OC} (quadrant 2), la cellule travaille alors en récepteur de très faible impédance, comme une diode polarisée en direct.

Si le courant traversant la cellule qui, en raison du circuit extérieur, est amené à dépasser la valeur du courant du court-circuit, la cellule va à nouveau travailler en récepteur, mais cette fois de très forte impédance, comme une diode polarisée en inverse.

On notera dans ce cas, qu'en raison de la résistance série R_S , la jonction n'est polarisée en inverse qu'à partir du point A pour lequel $V = -R_S I$.

Le quadrant 4, la cellule fonctionne en récepteur en polarité inverse (QM).

Considérons le quadrant 1 :

MN : La cellule solaire se comporte comme un générateur à courant constant ($I \cong I_{sc}$).

PS : La cellule solaire se comporte comme un générateur à tension constante ($V \cong V_{oc}$).

NP : La cellule solaire ne se comporte comme un générateur à courant ni en générateur à tension constante. [14]

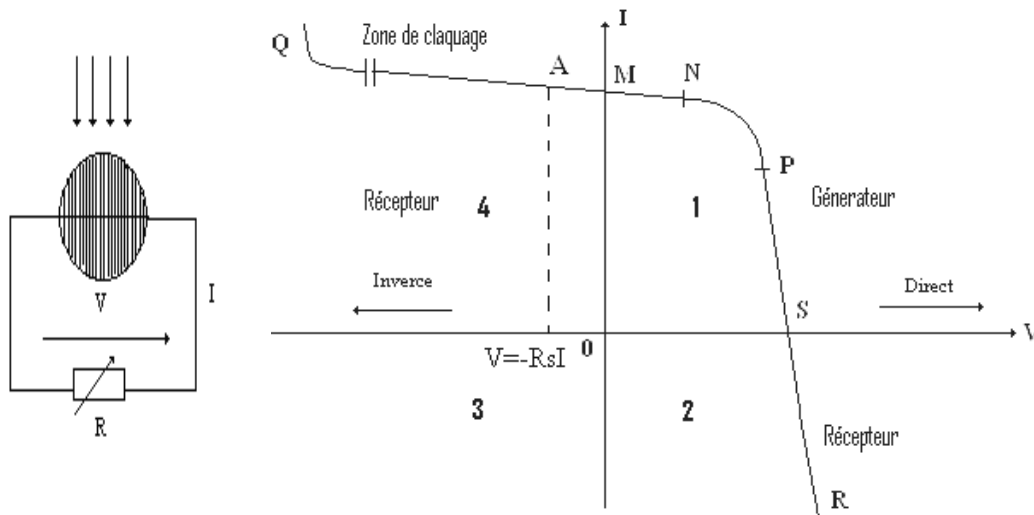


Figure (II-2) : Courbe d'une cellule solaire

II-1-1-Module :

Un module photovoltaïque est d'abord un convertisseur d'énergie lumineuse en électricité. Par définition c'est un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique suffisante lors de son exposition à la lumière. En effet, une photopile seule ne génère qu'une tension faible : de 0.5 à 1.5V selon les technologies. Il est donc nécessaire d'associer plusieurs photopiles en série pour pouvoir produire une tension exploitable.

Ces ensembles des cellules doivent être encapsulés dans des modules étanches qui les préservent de l'humidité et des chocs. [15]

II-1-2- Panneau :

Les modules peuvent être assemblés en panneaux, eux-mêmes interconnectés pour former un champ de modules. Dans une installation, l'ensemble des champs de modules constitue le champ photovoltaïque. [16]

II-2- Caractéristique électriques d'une cellule photovoltaïque :

A partir de la caractéristique I (V) de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propre à la cellule et notamment : [17]

I_{cc} : courant de court-circuit (obtenue pour $V=0$) ;

V_{co} : tension en circuit ouvert (obtenue pour $I=0$) ;

I_m : courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ;

V_m : tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ;

η : Rendement de conversion ;

FF : facteur de forme.

η : (Puissance électrique maximale fournie) / (Puissance solaire incidente).

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_i S} = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{P_i S} \quad (\text{II-1})$$

Avec :

P_i : puissance d'éclairement reçue par unité de surface ;

S : surface de la cellule photovoltaïque ;

FF : (Puissance maximale délivrée sur la charge) / ($V_{co} * I_{cc}$) :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (\text{II-2})$$

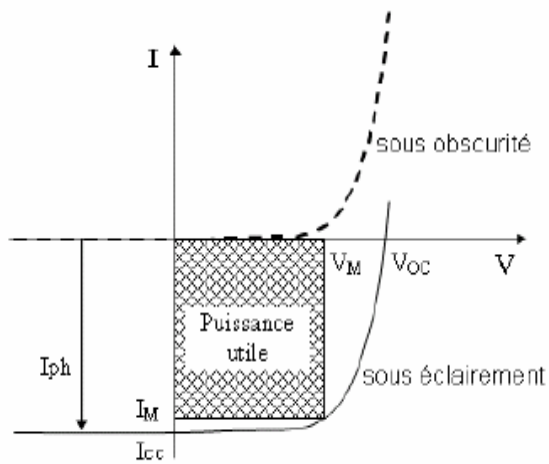


Figure (II-3) : Caractéristique $I(V)$ sous obscurité et sous éclairement

II-3-Circuit équivalent d'une cellule solaire :

II-3-1- Cas d'une cellule idéale :

Le cas d'une cellule idéale :

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] - I_{ph} \quad (II-3)$$

La jonction pn sous éclairement peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} (un courant inverse proportionnel à la lumière incidente) en parallèle avec une diode délivrant un courant. [18]

$$i = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (II-4)$$

Le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale, présenté figure (II-4).

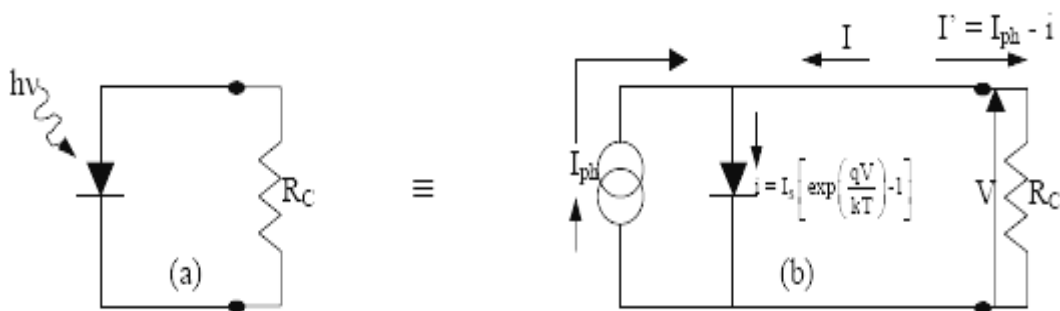


Figure (II-4) : Circuit électrique d'une jonction pn idéale sous illumination (a) connecté à une résistance de charge, et son circuit équivalent (b) [18].

Lorsque la jonction est reliée à une résistance de charge R_C , la tension V apparaît par la chute ohmique du courant à travers R_C (en circuit ouvert, $R_C \rightarrow \infty$ et $V \rightarrow V_{CO}$).

L'orientation de I_{ph} vers R_C produit une tension V induisant une polarisation directe à travers la jonction si bien que le courant (i) est de sens opposé à I_{ph} . D'un autre point de vue, nous pouvons considérer que la direction du photo courant dans la résistance de charge induit une tension à travers la jonction qui génère le courant direct i dans la direction opposée à I_{ph} , si bien que globalement nous n'observons pas le photo courant entier I_{ph} , mais seulement :

$$I' = I_{ph} - i \quad (II-5)$$

II-3-2-Cas d'une cellule photovoltaïque réelle :

Lorsque les résistances de contacts (résistivité des électrodes et des interfaces métal matériaux organiques) et les pertes ohmiques (dues à la résistivité des couches organiques) génèrent une résistance non négligeable par rapport à la résistance de charge, nous devons associer au schéma équivalent une résistance série (r_s) [18], comme il est présenté figure (II-8).

Si on note V_j la tension à travers la jonction, la tension V à travers la cellule est réduite à :

$$V = V_j - r_s I' \quad (II-6)$$

$$V = V_j \quad (II-7)$$

Dans le premier quadrant nous avons :

$$I' = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{qV_j}{kT}\right) - 1 \right] = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q[V + r_s I']}{kT}\right) - 1 \right] \quad (II-8)$$

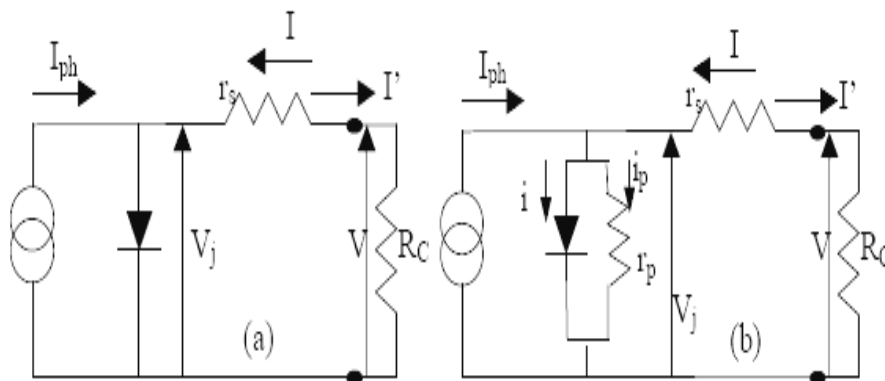


Figure (II-5) : Cas d'une jonction pn avec (a) une résistance série, et (b) résistances shunt et

De plus, lorsque des courants de fuite (des courants de court-circuit) apparaissent à travers la cellule, nous pouvons prendre en compte cette nouvelle composante en insérant une résistance parallèle (r_p) telle que $r_p \rightarrow \infty$ lorsque ces courants de fuite $i_p \approx 0$.

Nous obtenons :

$$I' = I_{ph} - i - i_p = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{qV_j}{kT}\right) - 1 \right] \frac{V_j}{r_p} \quad (\text{II-9})$$

En remplaçant V_j par

$$V_j = V + r_s I' \quad (\text{II-10})$$

Nous avons :

$$I' = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V + r_s I')}{kT}\right) - 1 \right] - \frac{V + r_s I'}{r_p} \quad (\text{II-11})$$

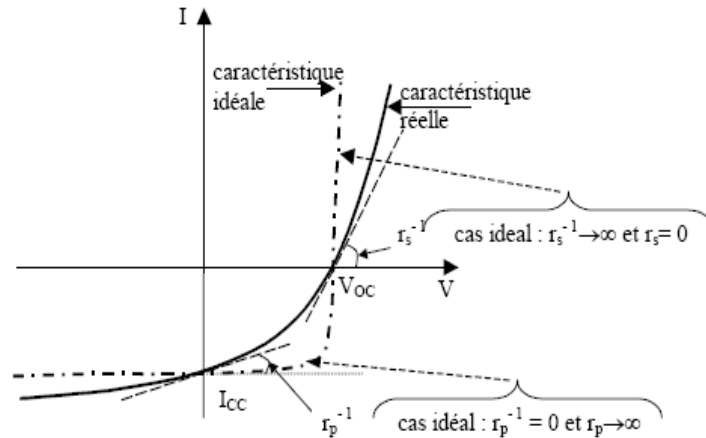


Figure (II-6) : Valeurs des résistances série et shunt liées aux pentes de la caractéristique $I(V)$ [18]

II-4- Influence de la résistance série :

La résistance série (R_s) est une résistance série qui due aux différentes résistances électrique que le courant rencontre sur son parcours. Elle représente la résistance du semi-conducteur constituant la jonction ainsi que les contacts métalliques et le câblage.

Son effet se traduit par une réduction de la tension autour de V_{oc} (ne modifier pas la tension de circuit ouvert, mais lorsqu'elle est anormalement élevée, elle peut diminuer notablement la valeur du courant de court-circuit) ce qui provoque une modification de l'allure de la courbe I-V autour de V_{oc} comme le montre la figure (II-7). Il s'ensuit une baisse de la puissance optimum, la tension V_0 s'écrit alors :

$$V_0 = V + R_s I \quad (\text{II-12})$$

Cette baisse de puissance provoque la diminution de la pente de la courbe I-V dans la zone où la cellule fonctionne comme un générateur à tension pratiquement constante. [19]

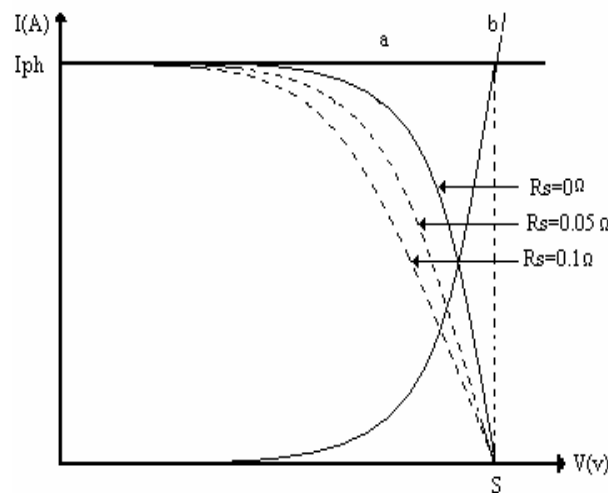


Figure (II-7) : Composantes de la courbe de puissance d'une photopile : influence de la résistance série [19]

II-5-Influence de la résistance shunt :

Elle caractérise un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière. Elle est généralement très supérieure à la résistance série R_S . La résistance shunt représente également les pertes à travers la jonction, autour des bords de la cellule et dans les régions non périphérique, en présence des défauts du cristal et de la précipitation des impuretés étrangères dans la région de la jonction. Ainsi donc, nous pouvons dire que R_{SH} est liée au processus de fabrication.

Son influence ne se fait sentir que pour les faibles valeurs de la tension. Cette influence se traduit par une diminution de la courbe I-V (on peut facilement percevoir une anomalie à la lecture de la caractéristique par la présence d'une légère pente au voisinage du point de courant de court circuit), dans la zone correspondant à un fonctionnement comme générateur à courant constant. Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo courant I_L une valeur de courant égale à $\frac{V_0}{R_{SH}}$. [19]

Une résistance série trop faible aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la photopile ; en outre, une photopile dont la résistance shunt trop faible ne donnera plus de tension sous faible éclairement [5]

La figure (II-8) montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme générateur à courant constant. [21]

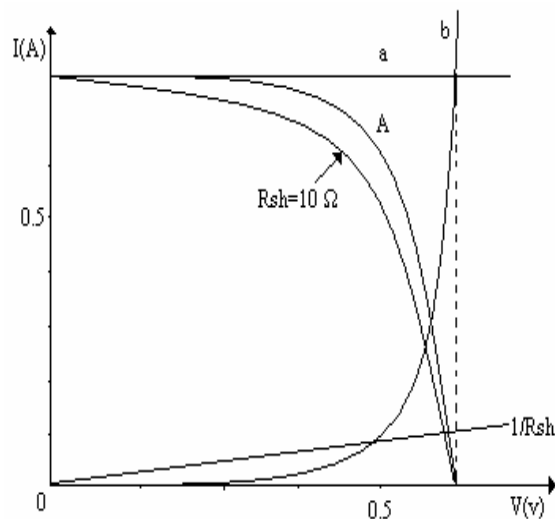


Figure (II-8) : Effet de la résistance shunt sur la courbe I (V) [19]

II-6- 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 [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-9).

D'après la (figure II-5), nous pouvons écrire :

$$I = -I_L + I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + R_S I)}{nKT}\right) - 1 \right] + \frac{V + R_S I}{R_{SH}} \quad (\text{II-13})$$

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

$$I_L \cong I_{SC} \quad (\text{II-14})$$

I_L : photo courant.

I_{SC} : courant de court-circuit.

Appliquons l'équation (16) à la (figure II-12) nous obtenons alors :

$$I_1 = I_{SC_1} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_1 + R_S I_1)}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-15})$$

$$I_2 = I_{SC_2} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_2 + R_S I_2)}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-16})$$

$$\text{Or } I_1 - I_{SC_1} = -\Delta I \quad \text{et} \quad I_2 - I_{SC_2} = -\Delta I \quad (\text{II-17}), (\text{II-18})$$

Ce qui fait :

$$\exp\left(\frac{q(V_1 + R_S I_1)}{nKT}\right) = \exp\left(\frac{q(V_2 + R_S I_2)}{nKT}\right) \quad (\text{II-19})$$

D'où :

$$\frac{V_1 + R_s I_1}{nKT} = \frac{V_2 + R_s I_2}{nKT} \quad (\text{II-20})$$

Soit

$$R_s = \frac{V_2 - V_1}{I_1 - I_2} \quad (\text{II-21})$$

Or

$$I_1 - I_2 = I_{sc1} - I_{sc2} \quad (\text{II-22})$$

Nous obtenons donc :

$$R_s = \frac{V_2 - V_1}{I_{sc1} - I_{sc2}} \quad (\text{II-23})$$

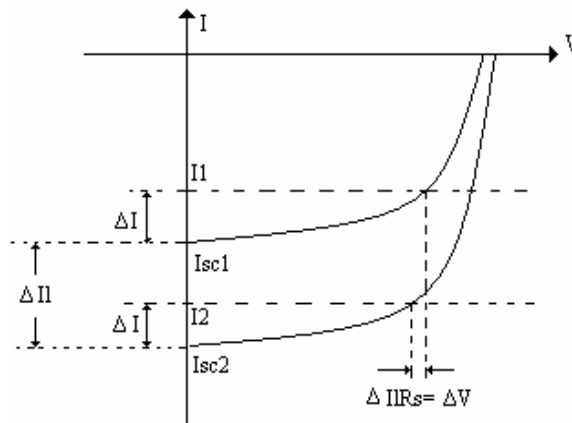


Figure (II-9) : Détermination graphique de la résistance série [18]

II-7-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 [18]

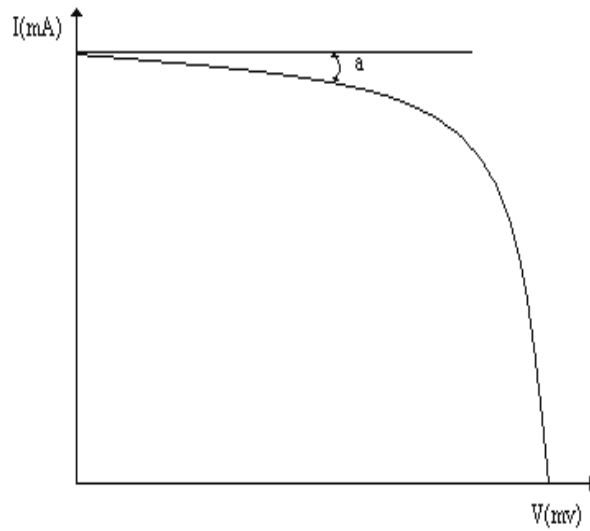


Figure (II-10) : Détermination graphique de la résistance shunt [18]

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 :

$$I = I_L - \frac{V + R_S I}{R_{SH}} \quad (\text{II-24})$$

$$I = \frac{I_L - V/R_{SH}}{1 + R_S/R_{SH}} \quad (\text{II-25})$$

En différenciant cette équation, on obtient :

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{1}{R_S + R_{SH}} \quad (\text{II-26})$$

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

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

Ainsi :

$$\text{tg } a = G_{SH} \quad (\text{II-28})$$

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

$$R_{SH} = \frac{1}{\text{tg } a} \quad (\text{II-29})$$

III-Connexions série, connexions parallèle, pour des cellules identiques :

Dans la pratique les cellules solaires ne sont pas utilisées seules mais elles sont regroupées entre elles pour former un module photovoltaïque. Les modules sont regroupés leur tour pour former un panneau solaire.

Généralement, dans le module les cellules sont groupées en série alors que dans le panneau les modules sont groupés en parallèle ou en séries parallèle constituant ainsi une matrice [23]. Les puissances demandées par les charges couramment utilisées nécessitent conjointement des tensions et des courants supérieurs à ceux que peuvent fournir les cellules élémentaires ; d'où l'utilisation de groupements séries parallèles [18].

III-1-Connexions séries :

Dans un groupement de ns cellules en série, toutes sont traversées par un même courant. La (Figure II-11) montre la caractéristique résultante (I_{sc} , V_{sco}) d'un tel groupement dans des conditions idéales, obtenue pour ns cellules identiques (I_{cc} , V_{co}) en sommant les caractéristiques élémentaires à courant constant : [23] [24]

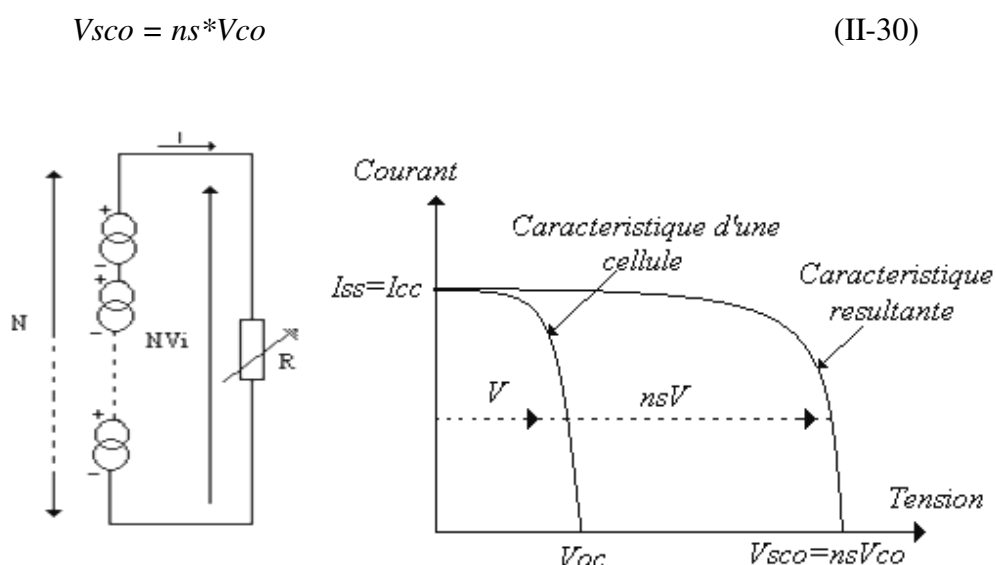


Figure (II-11) : Caractéristiques de groupement série des cellules [24]

III-2-Connexions parallèle :

Ce genre de groupement permet l'augmentation du courant du générateur. La tension générée par les cellules est la même, le courant passant par la charge est égal à la somme des courants de chaque branche. Dans le cas de la (figure II-12), il y a une cellule par branche, par conséquent la charge R sera traversée par un courant

$$I = \sum_{i=1}^M I_i \quad (\text{II-31})$$

Où M étant le nombre de cellules identiques, I_i : le courant débité par chaque cellule. De même que R sera soumise à une tension $V = V_i$, d'où V_i est la tension aux bornes d'une cellule. La courbe I-V du générateur, est obtenue en additionnant le courant de toutes les cellules pour une tension donnée.

Ainsi toutes les cellules étant identiques, la tension sera égal à la tension de chaque cellule. [18] [23] [24]

$$I_{pcc} = np * I_{cc} \quad (\text{II-32})$$

Pour un groupement de np cellules identiques en parallèle (figure II-12) :

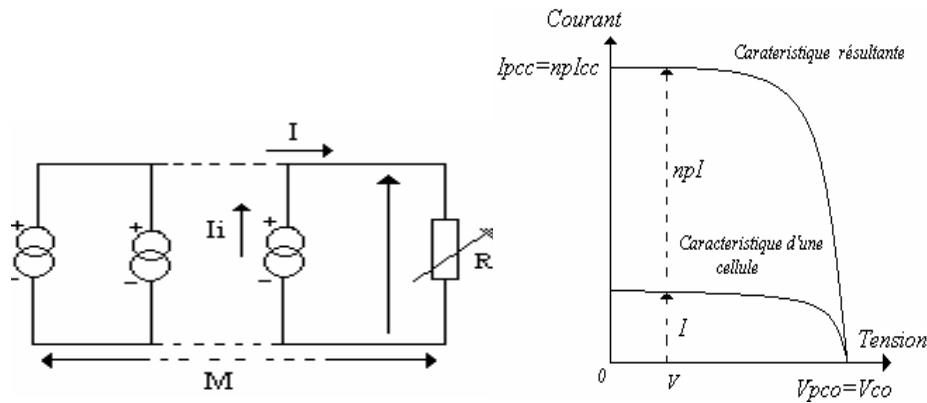


Figure (II-12) : Caractéristiques de groupement parallèle des cellules [24]

La Connexions des cellules solaires dans un module implique des problèmes inconnus au niveau de la cellule seule. Des graves problèmes sont apparus, leurs origines étant dues à une "non adaptation" des cellules individuelles. (La "non adaptation" est désignée sous le nom de "mismatch"[18]. Ceci est dû à différents raisons, comme le claquage d'une cellule,

l'occultation partielle, détérioration à l'encapsulation, différences physique entre les cellules : une cassure de cellule ou bien à une occultation partielle du module. [25]

IV-Occultation d'une cellule :

Deux cellules solaires court-circuitées sont indiquées en (figure II-13). Si l'une des cellules se trouve occultée, ceci signifie pour cette cellule que le générateur à courant n'existe plus. Comme R_{SH} , la résistance shunt d'une cellule, est assez élevée tout, le courant va passer par la diode. Après un moment donnée la diode claque, le circuit de trouve ouvert (entre A et B). La tension V aux bornes de la cellule ne s'inverse qu'à partir du point A (figure II-14), en raison de la résistance série. [26]

La deuxième cellule se trouve ainsi polarisée en inverse par rapport à la première, elle devient une charge. [27][28]

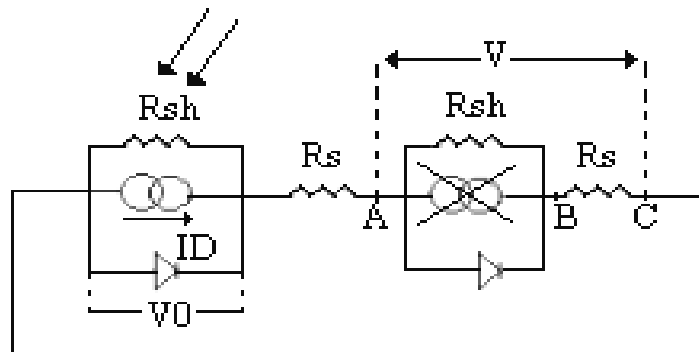


Figure (II-13) : Deux cellules série court-circuitées dont l'une est occultée [21]

La plupart des modules photovoltaïques sont constitués de cellules associées en série. Un exemple est en (figure II-14-(a)).

Le point de fonctionnement de chaque cellule est déterminé par l'intersection du courant I_0 de la chaîne série et de la courbe I-V. Ce qui correspond au point B de la (figure II-18-(b)). Dans ce cas puissance est produite. Le courant de court-circuit est supérieur à I_0 . [9]

Si une cellule est déficiente (courbe en pointillés figure (II-14(b)), le point de fonctionnement se situe en A c'est-à-dire dans le quadrant où la puissance est dissipée. La tension correspondant au point A est appelée "tension de panne". C'est un paramètre qui est rarement contrôlé et il se situe entre 15 et 50 Watts. [18]

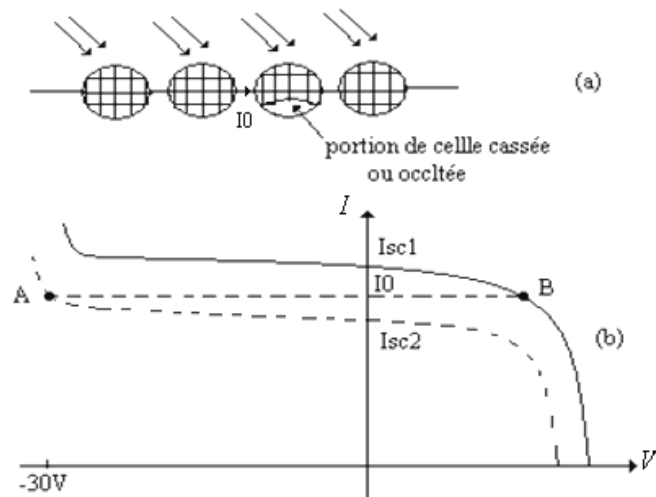


Figure (II-14) : Courbes $I(V)$ et point de fonctionnement d'une cellule déficiente [9]

Cette dissipation de puissance sous forme de chaleur au lieu de production électrique de puissance, au niveau de la cellule déficiente cela se produit lorsque le courant produit par la cellule a des performances inférieures par rapport aux autres de la chaîne cela se produit lorsque le cellule est occultée, ou tout simplement génère moins de courant que le module. [9]

Ce phénomène est appelé "hot spot" c'est-à-dire "point chaud". Il été mis en évidence la première fois par Black et Hanson [29]. Plusieurs publications ont été faites par Spirito et Albergamo 1982, Bishop 1988 et Bishop 1989, kovach 1995, a fait une analyse complète de la cellule solaire en polarisation inverse. Le résultat a été vérifié statiquement par Danner et Bucher 1997 et Laukamp et al 1998-1999, ont également constaté que sous conditions d'occultation la chaîne comprenant les cellules déficientes peut mener a des grandes dissipation de puissance et que même les petits ombres peuvent affecté sensiblement le rendement d'énergie[30].

La puissance dissipée étant égale au produit de la tension de panne par le courant (figureII-15).

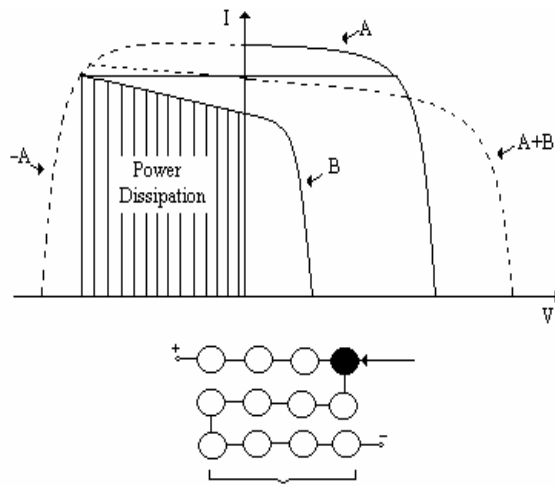


Figure (II-15) : Groupement série de A+B cellules (B étant occultée) [18]

Pour constituer un générateur solaire, les cellules sont associées entre elles pour produire des tensions et des puissances désirées. Une ou plusieurs cellules occultées affecteront la puissance obtenue [17]. Aussi allons nous étudier la gravité du problème dans deux types de connections de base : connections série, connections parallèle.

IV-1 Problème thermique :

IV-1-1-Puissance dissipée maximale dans un module :

Le flux énergétique reçu au sol, en provenance du soleil, et dans les meilleures conditions de AM_1 , les bonnes cellules actuelles offrent des rendements typiques de 15% plus de 80% devront donc être dissipées sous forme thermique au niveau des cellules. Cette énergie va entraîner une augmentation de la température de ces cellules [31]. L'encapsulation permet en outre l'évacuation de ces calories et va déterminer l'équilibre thermique atteint entre le module et le milieu extérieur. Elle a donc pour le but de protéger les propriétés, chimiques et électriques des cellules, sa qualité déterminera directement la durée de vie de modules photovoltaïques. La température maximale qu'une cellule peut atteindre en étant en sécurité dépend de cette encapsulation et peut arriver à 100°C. [32].

V- Connections série, Connections parallèle, pour des cellules non identiques

V-1- Connections série :

Pour des hautes puissances nécessitant des tensions élevées on place de plus en plus des cellules en séries. [18]

Si les cellules des modules en série ne sont pas identiques ou si certaines cellules sont partiellement ombragées, les problèmes apparaissant sont de plus en plus fréquents, la tension

d'utilisation des modules en série sera légèrement diminuée. Pour une impédance de charge faible, les cellules moins efficaces peuvent devenir réceptrices si le courant d'utilisation est inférieur au courant produit par ces cellules. Ainsi, pour une impédance nulle (court-circuit), une cellule ombragée sera soumise à ses bornes à une tension inverse égale à la somme des tensions délivrées par les autres cellules.

La puissance que devra dissiper cette cellule sera de : [33]

$$P_2 = V_t I \quad (\text{II-33})$$

Les cellules étant en série, le courant est le même dans toute la branche série. Considérons dans un premier temps deux cellules non identiques en séries, reliées à une charge L. La figure (II-16) donne la caractéristique résultant (l'addition point par point) de deux photopiles montées en série dont l'une (cellule2) est moins performante que l'autre. Pour une charge dont l'impédance correspond à la droite L, la cellule2 voit sa tension s'annuler : elle ne fonctionne alors ni en générateur ni en récepteur.

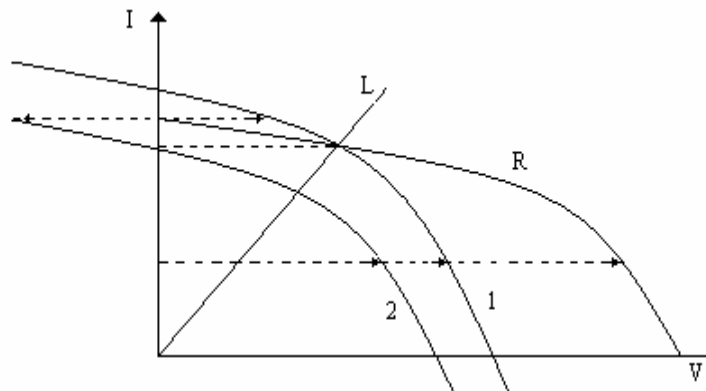


Figure (II-16) : Caractéristique I (V) de deux cellules en série dont l'une est de performances inférieures [18]

Elle représente la courbe résultante R du générateur formé par ces deux cellules, où la courbe (1) correspondant à la cellule la plus performante, et la courbe (2) à la cellule la plus faible.

Pour une charge dont l'impédance correspond à la pente de la droite L, la cellule (2) n'intervient plus (elle n'est ni génératrice ni réceptrice). Pour une charge plus faible la cellule (2) passe en récepteur en polarité inverse. Mais, le cas le plus critique c'est quand la

dissipation de puissance est maximale (la charge est nulle) comme indique bien la figure (II-17). La cellule (1) débite un courant I et la cellule (2) ne produit aucun courant. Lorsque la cellule (2) devient réceptrice, la tension V_1 appliquée à la première cellule compense exactement la tension V_2 de la deuxième [16]

$$V_2 = V_1 \quad (\text{II-34})$$

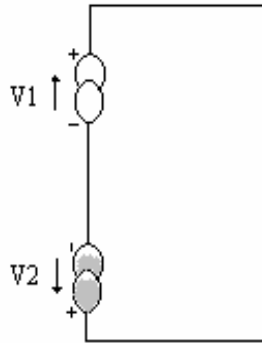


Figure (II-17) : Deux cellules séries en court circuit dont l'une est de performances inférieures [16]

Au moment où le nombre N de cellules connectées en série et en court circuit, si les derniers sont éclairés, on a le fonctionnement générateur. Par contre, dans le cas où une de ces cellules est occultée toujours dans les mêmes conditions, sa polarité devient en inverse, c'est une charge qui absorbe la puissance électrique délivrée par chacune des cellules éclairées. [12]

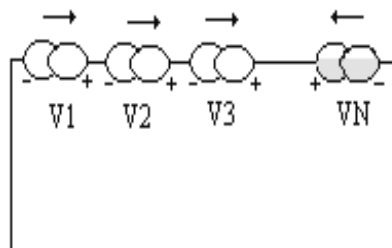


Figure (II-18) : n cellules série dont l'une est de performances inférieurs [16]

La figure (II-19) représente les N_s cellules connectées en série, pour un court circuit la tension de fonctionnement est nulle alors :

$$V=0 \quad (\text{II-35})$$

$$V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_N = 0 \quad (\text{II-36})$$

Si toutes les cellules sont identiques on aura :

$$V_1 = V_2 = V_3 \dots = V_N \quad (\text{II-37})$$

$$V_N = (n-1)V_1 \quad (\text{II-38})$$

Les $(N-1)$ cellules éclairées sont en série avec la cellule N occultée, cette cellule supporte une tension en polarité inverse égale :

$$V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_{N-1} \quad (\text{II-39})$$

Parce que le courant de court circuit de l'ensemble est inférieur au courant de court circuit des cellules éclairées.

La puissance électrique délivrée par chacune des cellules éclairées, est reçue par la cellule occultée. C'est la cellule occultée qui impose son courant. [35]

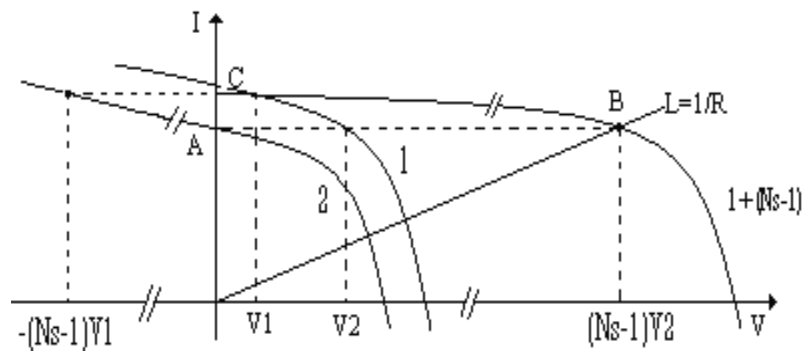


Figure (II-19) : Groupement en série de (N_s-1) cellules identiques (1) et une cellule de performances inférieures (2)

V-2- Connexions parallèle :

La connexion parallèle est surtout utilisée dans le groupement des modules pour la constitution de panneaux. [18]

Si les modules en parallèles ne sont pas identiques ou si quelques cellules d'un module sont ombragées, le courant d'utilisation total des modules sera plus faible. Pour une impédance de charge élevée, les modules moins performants deviendront récepteurs si la tension d'utilisation est supérieure à la tension produite par ces modules.

Une dissipation de puissance importante peut devenir dangereuse au niveau de la cellule la plus faible de ces modules. [33]

Nous allons prendre deux cellules non identiques connectées en parallèle.

La figure (II-19) représente la courbe résultante R pour ces deux cellules. Pour une charge dont l'impédance correspond à la pente de la droite L.

La courbe résultante est obtenue en faisant la somme des courants à tension constante figure (II-20).

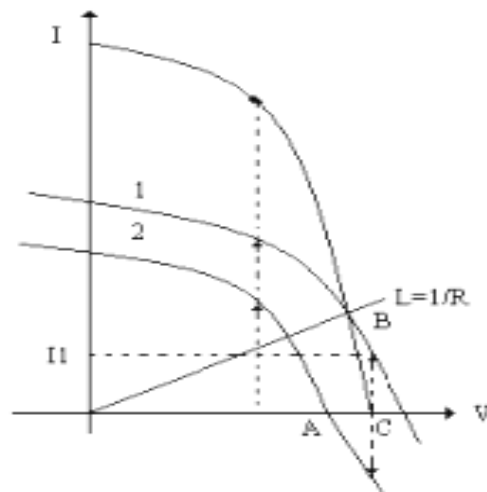


Figure (II-20) : Caractéristique I (V) de deux cellules en série dont l'une est de performances

A partir de B :

Pour une charge correspond à la pente de la droite L, La cellule (2) ne produit aucun courant.

Pour une charge d'impédance plus élevée, la cellule (2) passe dans le quadrant 2, fonctionnant en récepteur en polarisation directe.

Si R diminue, la cellule (2) devient génératrice.

Pour une impédance infinie, la droite de charge est confondue avec l'axe Ox.

La tension est celle du circuit ouvert (point A). [18]

Pour une charge infinie la cellule (1) débite le courant I1 dans la cellule (2). Voir la figure (II-21). [16]

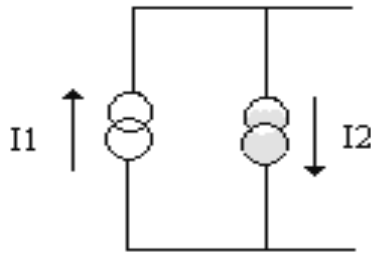


Figure (II-21) : Deux cellules en parallèle dont l'une est de performances inférieures [18]

Si on considère M cellules dont l'une est de performances inférieures. Pour une droite de charge de pente $L = \frac{1}{R}$ (R résistance variable), la cellule (2) passe en récepteur à partir du point C, correspondant à un circuit ouvert.

En condition de circuit ouvert, l'élément occulté doit pouvoir débiter un courant $(N_p-1)I$ à la tension V_{OC} . On notera que la tension de circuit ouvert de l'ensemble est inférieure à la tension de circuit ouvert individuelle des photopiles non occultées. [5]

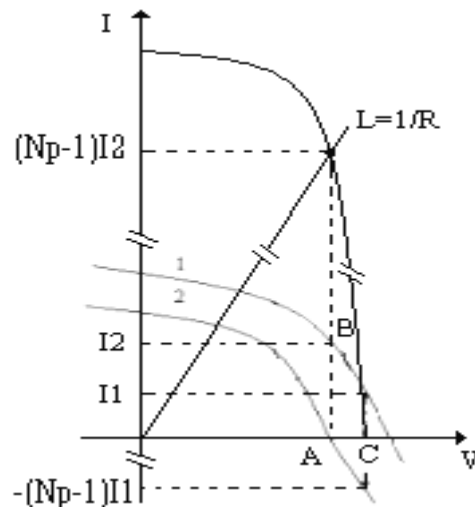


Figure (II-22) : Groupement en parallèle de (N_p-1) cellules identiques (1) et une de performances inférieures (2) [19]

On remarquera que la résistance série est forte, plus faible sera le courant inverse de la cellule occultée. à l'inverse une photopile idéale dont la résistance série serait très faible verrait son point de fonctionnement basculer vers de fortes valeurs de courant négatif pour maintenir sa tension égale à celle des autres. Le déséquilibre sera d'autant plus critique que l'impédance de charge est élevée. Là encore, une cellule peut avoir à dissiper une puissance électrique telle que l'encapsulation subisse de sévères dégradations.

Lorsque les N_p cellules connectées en circuit ouvert comme indique la figure $I=0$ alors :

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_{N-1} = -I_N \quad (\text{II-40})$$

$$I_N = (N_p - 1)I_1 \quad (\text{II-41})$$

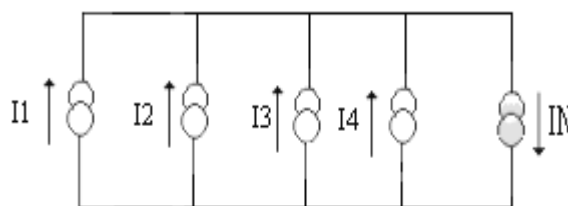


Figure (II-23) : Les cellules en parallèles dont l'une est de performance inférieur [18]

VI-Diodes de Protection :

VI-1-Protection par des diodes dans un groupement série :

Il peut arriver qu'une photopile occultée ait à supporter la tension directe des plusieurs modules en série, donc une polarisation inverse dépassent 30V, soit la tension de claquage. Une photopile standard ne peut supporter que des tensions inverses de l'ordre de la

dizaines de volts .En cas de déséquilibre il faut bien sur que la diode laisser passer le courant des modules qui se trouvent dans la branche et en fonctionnement normal la diode de protection doit pouvoir être polarisée avec une tension inverse égale à la tension de travail du module [5].

Si on place une diode de protection en polarisation inverse en parallèle sur chaque module .Si le module se trouve en cette polarisation, la diode devient passante.

A l'intérieur du module (2), la tension supportée par la cellule occultée sera limitée à la tension maximale que pourront générer les autres cellules de ce module. Dans ces conditions, le courant I dans les modules non perturbés (1, 2,3) sera égal à $ID+Im2$, ID étant le courant dans la diode et $Im2$ le courant dans le module déséquilibré .Dans ces conditions le courant I dans le branchement devient [3] [13] [27] :

$$I = I_{DP} + I_{OC}$$

I_{DP} : Le courant de la diode.

I_{oc} :le courant qui circule dans le module.

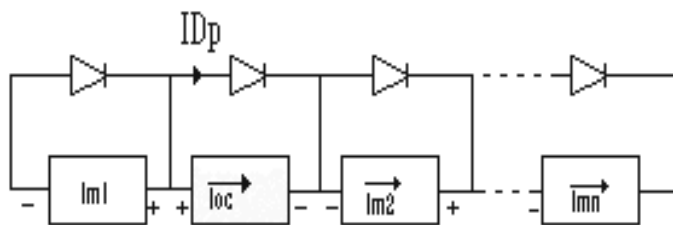


Figure (II-24) : Diode de protection en groupement série [27]

VI-2-Protection par des diodes dans un groupement parallèle :

Dans le montage parallèle, on peut brancher une diode série D_S (sur chaque module) empêchant le courant de s'inverser et bloque donc son groupe de photopiles si celui-ci devient récepteur. Cette diode pouvant protéger toute une branche, et doit supporter le courant généré par la série des photopiles. [35]

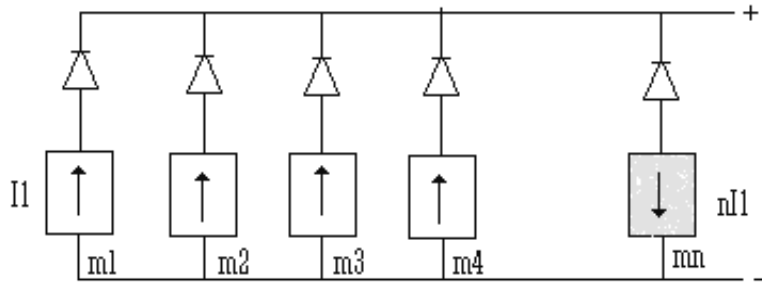


Figure (II-25) : Diode de protection en groupement parallèle [35]

VII-Conclusion :

De ces deux types de connexions, quelles sont celles qui sont le plus affectées par le problème de "hot spot " ?

Dans la figure (II-24-a) : $I_{sc}(N-1) \neq I_{sc}(N)$ (II-42)

$$V_{oc}(N-1) \approx V_{oc}(N) \quad (\text{II-43})$$

Le courant d'un court-circuit est fortement affecté

Dans la figure (II-24-b) : $I_{sc}(N-1) \approx I_{sc}(N)$ (II-44)

$$V_{oc}(N-1) \neq V_{oc}(N) \quad (\text{II-45})$$

C'est plutôt la tension circuit ouvert, mais elle est moins affectée que I_{sc} dans la connexion série. Ainsi nous pouvons dire que le problème de "hot spot " est plus grave dans le cas d'une association série [24].

Il est d'autant plus important que le nombre de cellule placées en série est plus grand, et que la portion du système qui occultée est grande. [36]

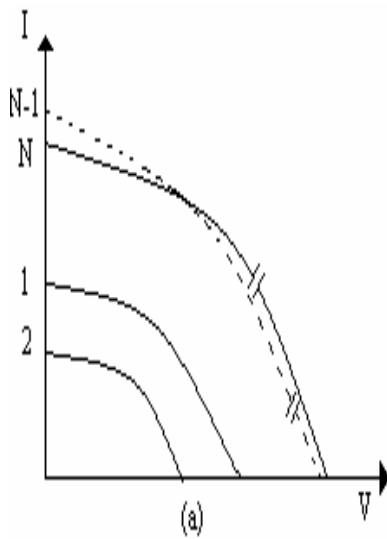


Figure (II-24-a) : N Cellules connectées en série dont l'une est de performances inférieurs [15]

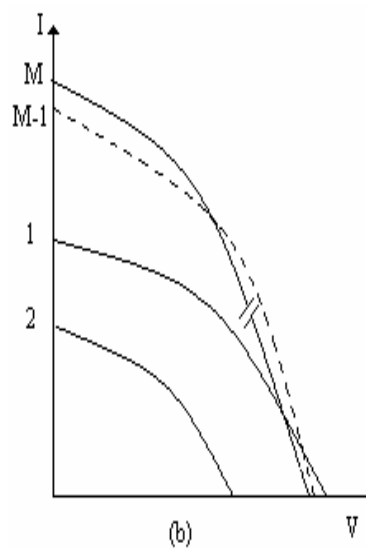


Figure (II-24-b) : M Cellules connectées en parallèle dont l'une est de performances inférieurs [15]

CHAPITRE III

***LES APPROCHES DE
CALCULES DE LA
CARACTERISTIQUE I (V)
D'UNE CELLULE
SOLAIRE***

Introduction :

Le point essentiel, lors de la conception du système photovoltaïque est la rentabilité du système. Il s'agit donc de faire fonctionner le système à son point de puissance maximum. Nous avons vu dans le chapitre précédant qu'une détérioration de la cellule, due à une dispersion de paramètres ou à une occultation a un effet sur l'allure de la courbe $I(V)$, par conséquent le point de fonctionnement optimum se trouve déplacé, on doit donc tenir compte de ces nouveaux paramètres dans le processus de fabrication ainsi que dans l'assemblage des éléments constituant le générateur photovoltaïque.

Dans ce chapitre nous présentons un nouveau modèle de simulation de module photovoltaïque occulté tenant compte simultanément de la tension inverse (tension d'avalanche) et la résistance shunt, basé sur la combinaison de deux modèles existant dans la littérature que nous développerons dans ce chapitre.

I-La méthode numérique utilisée pour résoudre l'équation de caractéristique $I(V)$:

Nous présentons succinctement différentes méthodes de résolution appliquées à l'équation non linéaire $I(V)$.

Les méthodes analytiques de résolution des équations algébriques polynomiales sont limitées à certaines formes de faible degré telles que les équations quadratiques, cubiques et quartiques, et à des formes particulières du type [37] :

$$F_N = ax^{2n} + bx^n + c = 0 \quad (\text{III-1})$$

Pour les équations polynomiales entières de degré supérieur à quatre il n'existe guère des méthodes exactes de résolution et l'on doit employer des méthodes numériques pour trouver les racines.

I-1-Méthode des points fixes :

Pour résoudre les équations non linéaires de la forme $f(x)=0$ en un problème équivalent

de la forme $x = g(x)$, dans certains cas le choix de la fonction itérative $x = g(x)$, converge vers l'une ou l'autre des racines et peut même diverger.

I-1-Méthode de Newton :

La méthode de Newton Raphson est l'une des méthodes les plus utilisées pour la résolution des équations non linéaires.

L'algorithme de cette méthode est basé sur l'utilisation du développement de Taylor.

Soit une équation à résoudre de la forme :

$$f(x) = 0 \quad (\text{III-2})$$

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

$$0 = f(x_0 + \delta x) \quad (\text{III-3})$$

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

$$0 = f(x_0) + f'(x_0)\delta x + \frac{f''(x_0)(\delta x)^2}{2!} + \frac{f'''(x_0)(\delta x)^3}{3!} + \dots \quad (\text{III-4})$$

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

$$f(x_0) + f'(x_0)\delta x \approx 0 \quad (\text{III-5})$$

On peut alors isoler la correction recherchée :

$$\delta x = -\frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (\text{III-6})$$

La correction δx est en principe la quantité que l'on doit ajouter à x_0 pour annuler la fonction $f(x)$ puisque nous avons négligé les termes d'ordre supérieur ou égal à 2 dans le développement de Taylor, cette correction n'est pas parfaite et on pose :

$$x_1 = x_0 + \delta x \quad (\text{III-7})$$

I-1-La méthode de bisection :

La méthode de la bisection repose sur une idée tout simple ; une fonction continue $f(x)$ change de signe et passe du positif au négatif autour d'une racine α . Soit x_0 le milieu de l'intervalle $[a, b]$, se trouve dans l'un des deux intervalles $[a, x_0]$, $[x_0, b]$.

- Si $f(a)*f(b) < 0$, alors f a au moins une racine dans $[a, b]$.
- Si $f(x)=0$ pour tout x de $[a, b]$, la racine est unique.
- Si $f(a)*f(b) > 0$, alors n'a pas de racine dans $[a, b]$ ou f a un nombre pair de racines dans $[a, b]$.

- Si $\alpha \in [a, x_0]$ on pose : $a_1=a$, $b_1=x_0$
- Si $\alpha \in [x_0, b]$ on pose : $a_1=x_0$, $b_1=b$

En itérant ce procédé, on obtient une suite de valeurs :

$$x_0 = \frac{a+b}{2} ; x_1 = \frac{a_1+b_1}{2} ; \dots x_n = \frac{a_n+b_n}{2} \quad (\text{III-8})$$

Qui vérifiant l'inégalité :

$$\alpha - x_n \leq \frac{b-a}{2^{n+1}} \quad (\text{III-9})$$

Cette inégalité permet d'estimer à l'avance le nombre d'itérations nécessaires pour approcher α avec une précision donnée

Ce n'est pas toujours le cas puisque la fonction $f(x)$ peut aussi être tangente à l'axe de X voir figure (III-1).

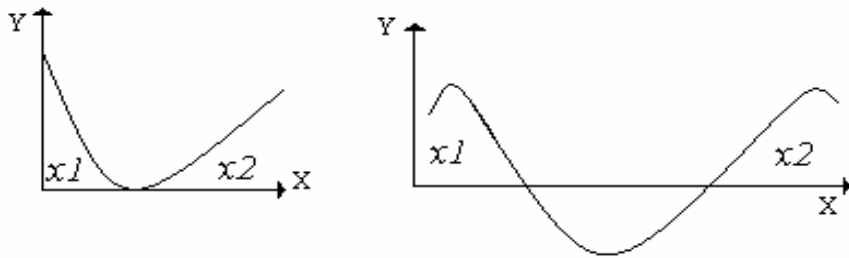


Figure (III-1) : Cas spécifique de méthode de bisection

Les différentes simulations numériques réalisées pour la détermination de la courbe I (V) d'une cellule solaire [21] montrent que la méthode de Dichotomie (ou bisection) qui a convergé le plus vite et le moins complexe.

II-L'importance de la résistance shunt dans le problème de « hot spot » :

Dans les conditions normales de fonctionnement, les cellules présentant les plus grande résistance shunt, sont les plus performantes. aussi certains producteurs de cellules solaire ont maximisé la puissance de leurs cellules par l'augmentation de la résistance shunt ; cependant lors d'une occultation, ces cellules qui présentent des courbes inverse « plates » présentent des tensions de panne élevées ; d'où l'importance de la puissance dissipée (figure III-2). Une conclusion importante a été tirée par plusieurs chercheurs [27,38] : Une diminution de la résistance shunt avec un sacrifice négligeable de la puissance extraite peut conduire à une diminution de la puissance dissipée.

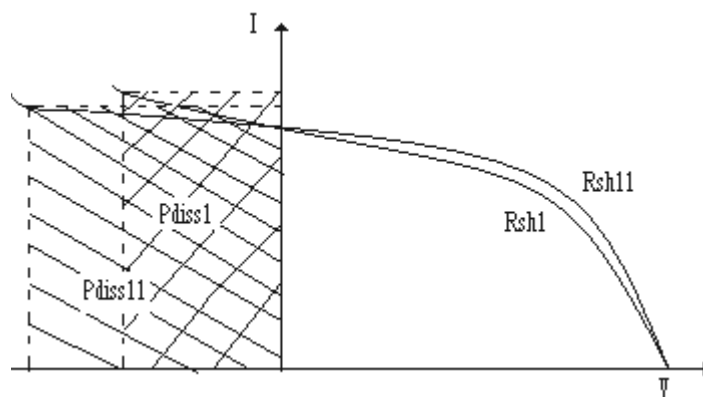


Figure (III-2) : Puissance dissipée pour deux valeurs de résistance shunt

II-1-L'influence de la résistance shunt et de l'occultation sur la courbe I (V) :

La résistance shunt est introduite par l'intermédiaire de la résistance caractéristique R_{CH} qui présente le rapport entre la tension circuit ouvert et le courant de court circuit pour une cellule [38]. La relation entre R_{SH} et R_{CH} est plus significative car elle fait intervenir le « fill factor » FF [39].

$$FF = FF_0 \left\{ 1 - \frac{v_{oc} + 0.7 FF_0}{v_{oc}} \frac{1}{r_{sh}} \right\} \{1 - r_s\} \quad (III-10)$$

rsh: résistance shunt normalisée = R_{SH}/R_{CH}

Rs: résistance série normalisée = R_s/R_{CH}

Voc : tension de circuit ouvert normalisée = $\frac{V_0}{nkt/q} = \frac{V_{oc}}{nV_T}$

$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{v_{oc}} \quad (\text{III-11})$$

Formule empirique valable seulement si $v_{oc} > 10$.

A flux et a température constant, la courbe I-V est déterminée d'après la figure (III-2). Le courant traversant la charge sera :

$$I = I_0 \left\{ \exp\left(\frac{q}{nkt} v_D\right) - 1 \right\} - I_L + \frac{v_D}{R_{SH}} \quad (\text{III-12})$$

$$v_D = v - IR_S \quad (\text{III-13})$$

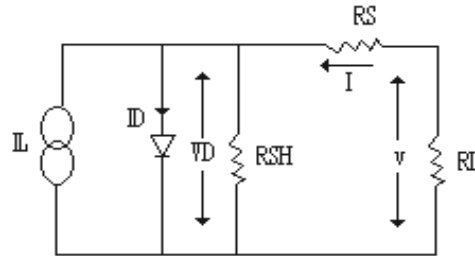


Figure (III-3) : schéma électrique réel d'une cellule solaire illuminée

- v indique la tension aux bornes de la cellule.
- V indique la tension aux bornes du module.

En considérant un module de 36 dont une est occultée :

$$I_s = I_0 \left[\exp\left\{ \frac{q}{nkt} (v_s - I_s R_s) \right\} - 1 \right] - Q I_L + \frac{v_s - I_s R_s}{R_{SH}} \quad (\text{III-14})$$

$$I_i = I_0 \left[\exp\left\{ \frac{q}{nkt} (v_i - I_i R_s) \right\} - 1 \right] - I_L + \frac{v_i - I_i R_s}{R_{SH}} \quad (\text{III-15})$$

Q est le rapport de courant généré par la cellule occultée, sur le courant généré par la cellule pleinement illuminée [19].

- $Q=0$ la cellule est complètement occultée.
- $Q=1$ la cellule est complètement illuminée.

L'indice s se rapporte aux quantités associées aux cellules occultées, par contre l'indice i se rapporte aux quantités associées aux cellules illuminées.

Pour une chaîne série nous avons vu dans le chapitre II que la cellule la plus faible imposait son courant ; I_s et I_i peuvent donc être remplacés par le même courant I .

$$I = I_0 \left[\exp \left\{ \frac{q}{nkt} (v_s - IR_s) \right\} - 1 \right] - QI_L + \frac{v_s - IR_s}{R_{SH}} \quad (\text{III-16})$$

$$= I_0 \left[\exp \left\{ \frac{q}{nkt} (v_i - IR_s) \right\} - 1 \right] - I_L + \frac{v_i - IR_s}{R_{SH}} \quad (\text{III-17})$$

v_s étant négative, nous pouvons faire l'approximation suivante :

$$\exp \left\{ \frac{q}{nkt} (v_i - IR_s) \right\} \phi \phi \exp \left\{ \frac{q}{nkt} (v_s - IR_s) \right\} \quad (\text{III-18})$$

L'équation (III-16) devient :

$$I = -(I_0 + QI_L) + \frac{v_s - R_s I}{R_{SH}} \quad (\text{III-19})$$

$$\text{Et} \quad v_s = (I_0 + QI_L)R_{SH} + IR_s \quad (\text{III-20})$$

Dans l'équation (III-20) $R_{SH}I_0$ est négligé devant les autres termes

$$V = \sum_{j=1}^{35} (v_i)_j + v_s + 35v_i + v_s \quad (\text{III-21})$$

v_i dans l'équation (III-17) est éliminé, on considère les équations (III-17), (III-20), (III-21) ce qui représente le courant généré par un module dont une cellule est occultée .

$$I = I_0 \left(\exp \left[\frac{1}{35} \frac{q}{nkT} \{V - (I + QI_L)R_{SH} - 36IR_s\} \right] - 1 \right) - I_L + \frac{V - (I + QI_L)R_{SH} - 36IR_s}{35R_{SH}} \quad (\text{III-22})$$

L'équation est valable seulement si :

$$I \geq QI_L$$

Ou si $V \leq V_{OC} - V_{oc}$

Dans le cas d'un éclairage total, l'équation (III-22) n'est plus valable il faut considéré alors l'équation (III-17).

Remarque :

Le module avec une cellule occultée se comporte comme un module de 35 cellules identiques comprenant une résistance série égale à $R_s + \left[1 + Q \left(\frac{I_L}{I} \right) \right] R_{SH}$, car la cellule occultée se comporte à présent comme une résistance [19].

Le module utilisé par M.Green [38] , pour le quel l'équation (III-22) à été déterminée, est un module de 36 cellules de 4cm^2 ,dont $V_{oc} = 628 \text{ mV}$, $I_0 = 10^{-9} \text{ mA.cm}^{-2}$, $n=1$, $kt/q=26\text{mV}$.

La figure (III-4) représente les courbes pour un tel module dont une cellule est occultée pour : 0 ; 0.25 ; 0.5 ; 0.75 ; 1, pour quatre valeurs de résistance shunt $.6R_{CH}$, $10 R_{CH}$, $20R_{CH}$, $200R_{CH}$.

La figure (III-4-d) utilisant la plus grande résistance shunt est la plus mauvaise du point de vue rentabilité lors de l'occultation. Pour un éclairage total $Q = 1$, elle présente les meilleures performances. De cette figure Green déduit que $R_{SH} = 20R_{CH}$ est la valeur optimale. R_{sh} doit donc optimisée. D'après les références [40, 41, 42], $R_{SH} = 10R_{CH}$, ce qui est confirmée par la figure (III-4) [38].

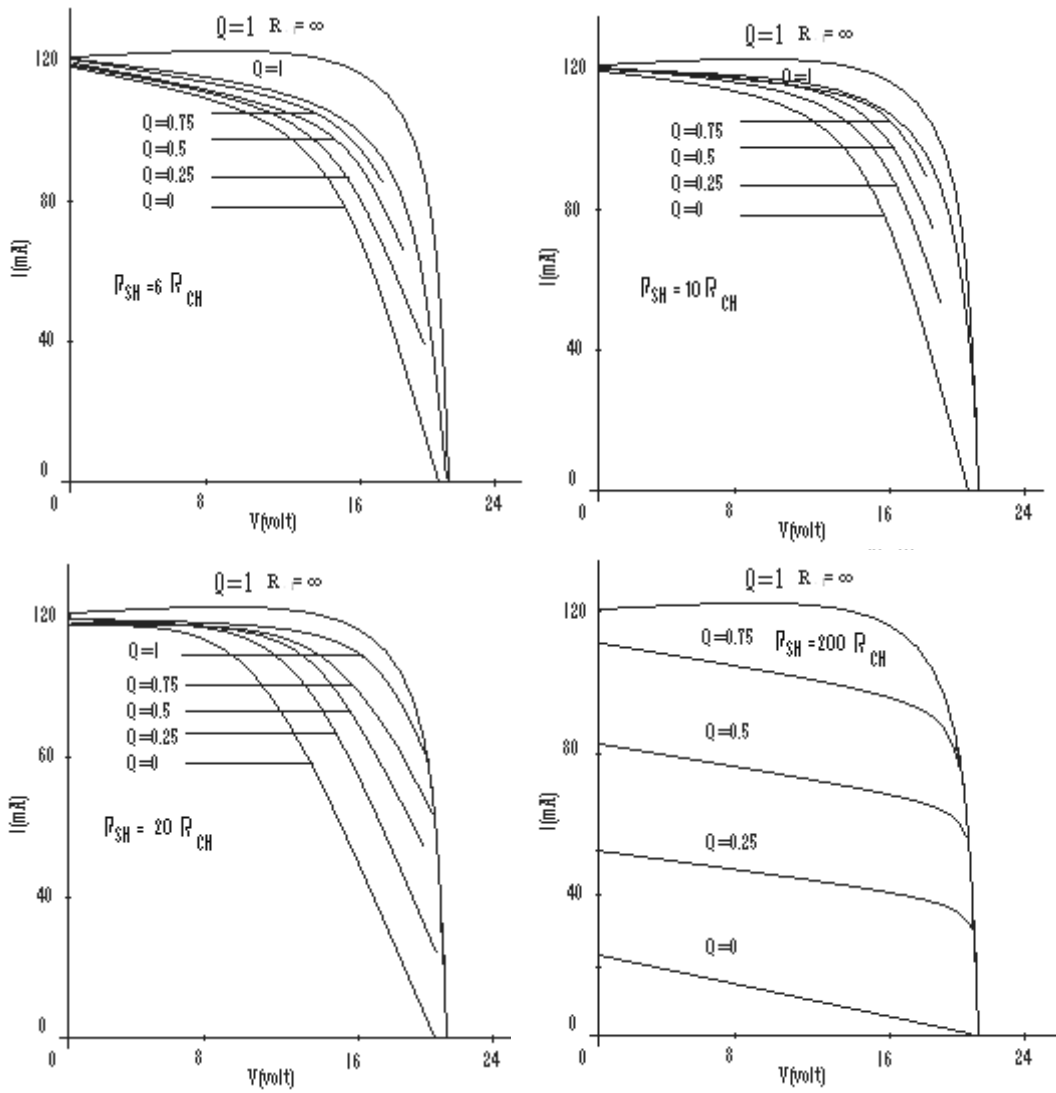


Figure (III-4) : Courbe I-V pour des valeurs précises de R_{sh} avec le coefficient Q comme paramètre [38]

La figure (III-5) illustre les variations de la puissance due à une occultation complète d'une cellule, en fonction de R_{SH} . Les valeurs élevées de R_{SH} sont les plus mauvaises.

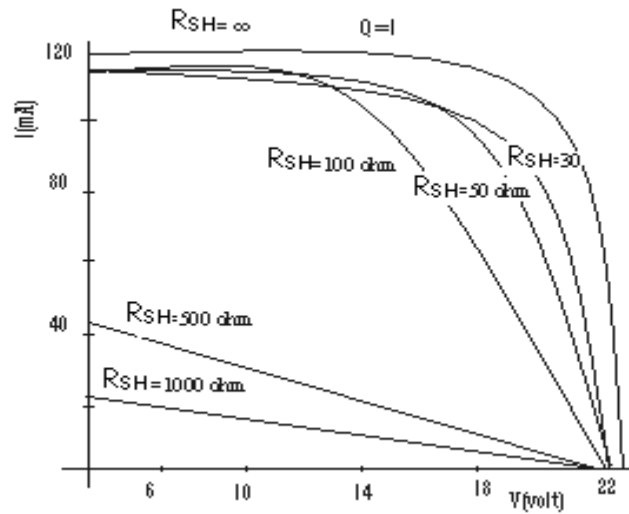


Figure (III-5) : Variation de la courbe I-V d'un module de 36 cellules dont une est occultée, avec R_{sh} comme paramètre [38]

III-Puissance dissipée dans la cellule occultée :

Le rendement du module photovoltaïque dépend de la température de fonctionnement des cellules. On note une diminution de 0.5 à 0.7% par C° avec l'augmentation de la température de la cellule. Cette dernière est étroitement liée aux qualités de dissipation thermique. Il est pratiquement impossible de mesurer la température au niveau de la jonction dans le semi conducteur. Tout au plus pourra-t-on mesurer la température de la plaquette de silicium à l'aide d'une microsonde thermique introduite dans le module [43,44] ou à l'aide d'une caméra à infra rouges.

La puissance dissipée dans le module est obtenue à partir de l'équation (III-20) [19]

$$P_{diss} = I V_S = I(I + Q I_L) R_{SH} + I^2 R_S \quad (III-23)$$

Sous les conditions de court circuit la puissance dissipée est obtenue en posant $I=I_{SC}(Q)$
 $I_{SC}(Q)$ est le courant de court circuit lorsque la cellule est occultée.

La figure (III-6) met en évidence l'influence de la puissance dissipée, en fonction de Q avec R_{SH} comme paramètre.

Pour $R_{SH} < 34R_{CH}$, on remarque une diminution de la puissance dissipée avec l'augmentation de l'éclairement. Cependant pour les grands valeurs de R_{SH} , on remarque que les conditions de fonctionnement les plus critiques ne correspondent pas $Q=0$ mais suivant la valeur de R_{SH} , elle se situent entre 0.4 et 0.9. [43, 45]:

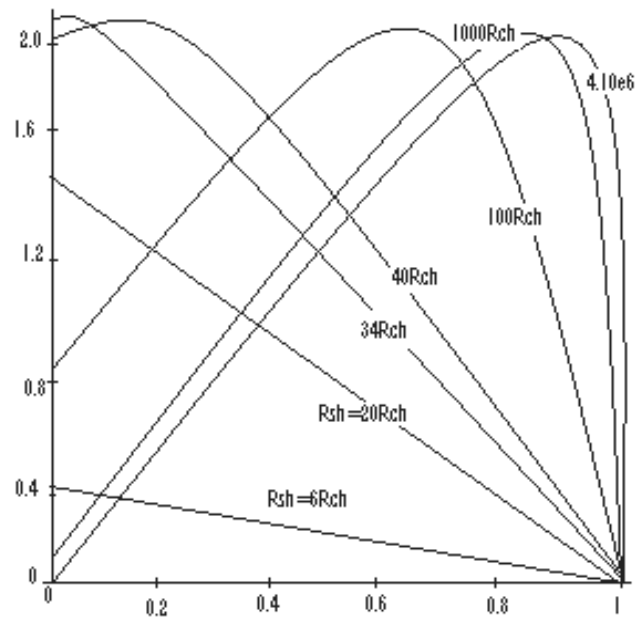


Figure (III-6) : La puissance dissipée par une cellule occultée en fonction de coefficient d'occultation Q

IV-Occultation de plusieurs cellules :

L'occultation étant accidentelle, généralement plus d'une cellule sont ombragées. En supposant que plusieurs cellules sont également occultées, l'équation (III-13) reste valable. Sachant que Y est le nombre des cellules occultées, N nombre de cellules série, et Z nombre des cellules éclairées, nous obtenons une équation plus générale [45].

$$I = I_0 \left(\exp \left[\frac{1}{2} \frac{q}{nkT} \{ V - Y(I + QI_L)R_{SH} - NIR_S \} \right] - 1 \right) - I_L \frac{V - Y(I + QI_L)R_{SH} - NIR_S}{ZR_{SH}}$$

(III-24)

Où $Z = N - Y$

L'équation (III-24) est valable dans le cas où $V < V_{oc} - YV_{oc}$ seulement.

Une expression générale de la résistance shunt optimum en fonction de l'occultation peut être réduite en différenciant l'expression (III-24).

On remarque alors que pour une valeur donnée d'occultation ; la valeur de R_{SH} optimum pour un maximum de puissance à tension constante diminue avec l'augmentation de nombre de cellules occultées. Pour $Y=2$, la valeur optimum de $R_{SH} = 60\%$ de la valeur de R_{SH} optimum pour $Y=1$ [45].

Vu de l'intérêt de plus en plus croissant concernant les prévisions de pannes dans les installations PV, les conséquences souvent catastrophiques, car permanentes, qui peuvent apparaître sont le plus souvent dues à la polarisation inverse des cellules se transformant ainsi en charge et impliquant une puissance dissipée très grande.

Une étude a été réalisée pour établir un modèle de caractéristique concernant la polarisation inverse de la cellule solaire applicable pour les différents types de cellules dans les diverses conditions de fonctionnement.

V-Différents modèles existent dans la littérature :

V-1- la courbe I (V) :

Il y a plusieurs équations proposées en littérature pour simuler le comportement des cellules PV à la polarisation inverse la plus part d'entre elles vient de l'équation conventionnelle I (V) d'une manière quelconque.

Une analyse a été faite de la puissance dissipée dans la partie inverse de la cellule occultée. Le résultat d'analyse est représentée par différentes configurations ; pour chaque

cas le point d'occultation partielle d'une cellule est déterminé en fonction de degré d'occultation, cette dernière à été défini comme le rapport entre le courant I_{sc} de la cellule occultée et le courant I_{sc} de la cellule illuminer [19].

V- 2-Puissance dissipée :

La puissance dissipée par une cellule occultée [25] dépend de :

- la forme de la partie inverse de la caractéristique $I(V)$ de la cellule occultée.
- degré de non adaptation courant-tension (entré/sortie) « mismatch » entre la cellule occultie et les autres cellules.
- différentes configurations.

En 1982 Spirito et Albergamo [25] ont fait un distinction entre les cellules d'un type A dominées a la polarisation inverse par multiplication d'avalanche, et des cellules de type B dominées par des effet de la résistance shunt à la polarisation inverse.

V-2-1- Les cellules de type A :

Pour les cellules de type A la caractéristique de la courbe $I(V)$ peut être décrit par l'expression : [25]

$$I = \left(I_{sc} - I_0 \left(\exp \frac{V}{AV_T} \right) \right) M(V) \quad (\text{III-25})$$

V_T : tension thermique égal à 26Mv.

A : facteur de qualité.

Avec $M(V)$ est le facteur de multiplication, peut être exprimé par la formule de Miller :

$$M(V) = \frac{1}{\left(1 - \left(\frac{V}{V_{br}} \right)^x \right)} \quad (\text{III-26})$$

V_{br} : la tension d'avalanche.

x :l'exposant de Miller. $3 < x < 6$. [25]

V-2-2- Les cellules de type B :

Pour les cellules de type B la caractéristique de la courbe $I(V)$ peut être décrit par l'expression :

$$I = I_{sc} - I_0 \left(\exp \frac{V}{AV_T} - 1 \right) - \frac{V}{R_{SH}} \quad (\text{III-27})$$

V-3-Interconnexions considérables :

Pour chaque configuration du système les pires conditions apparaissent lorsque la sortie du système est en court circuit [25].

Pour les cellules de type A rappelons l'équation (III-25) écrite pour $V < 0$ et en négligeant le terme exp dans la partie inverse :

$$\left(\frac{m - moc}{m} + \frac{moc}{m}(F) \right) = \left(1 - \frac{I_0}{I_{sc}} \left(\exp \frac{V}{(n-1)AV_T} - 1 \right) \right) \frac{1}{M(V-1)} \quad (III-28)$$

n : le nombre des cellules du module photovoltaïque.

F : facteur d'occultation.

$F=0$ occultation totale.

La puissance dissipée respectivement par chaque cellule ; cellule déficiente « moc » et cellule éclairée « m » est donnée par :

$$PD_1 = (V-1)(F)I_{sc}M(V-1) \quad PD_2 = (V-1)I_{sc}M(V-1) \quad (III-29)$$

Les équations (III-28) et (III-29) permettent de déterminer pour chaque valeur de Q le point de fonctionnement de la chaîne parallèle contenant la cellule occultée et la puissance dissipée pour les deux cellules éclairée et déficiente du parallèle.

Pour le type B les équations (III-28) et (III-29) deviennent respectivement :

$$\left(\frac{m - moc}{m} + \frac{moc}{m}(F) \right) = \left(1 - \frac{I_0}{I_{sc}} \left(\exp \frac{V}{(n-1)AV_T} - 1 \right) \right) - \frac{V-1}{RshI_{sc}} \quad (III-30)$$

$$PD_1 = (V-1)(F)I_{sc} + \frac{(V-1)^2}{Rsh} \quad PD_2 = (V-1)I_{sc} + \frac{(V-1)^2}{Rsh} \quad (III-31)$$

V-3-!-Connexion série parallèle :

Dans le cas de la figure (III-7) :

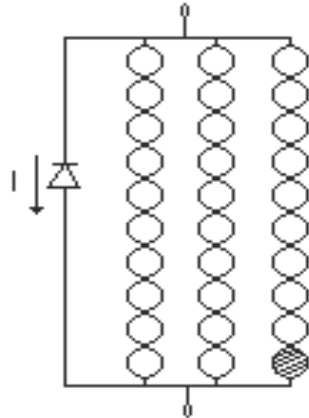


Figure (III-7) : Connexion série parallèle des cellules [25]

Pour les cellules de type A les courbes de la puissance dissipée ont été tracé en fonction de degré d'occultation pour différent valeurs de n figure (III-8).on note que :

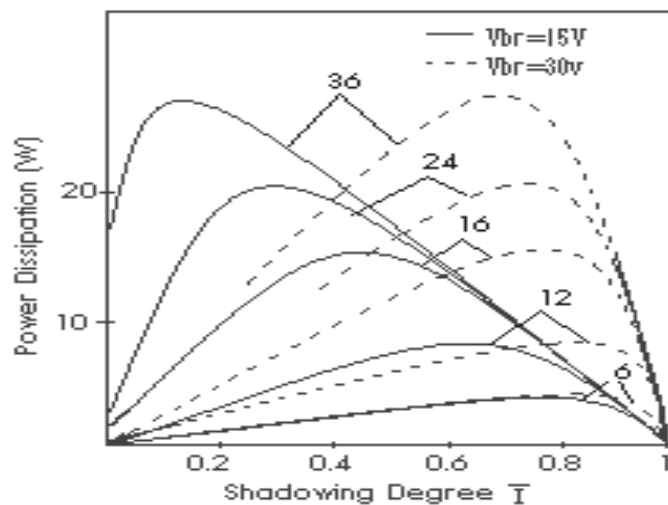


Figure (III-8) : La puissance dissipée par la cellule occultée dans la configuration série parallèle (type A) [25]

-le maximum de puissance dissipée augmente avec l'augmentation du nombre des cellules en série éclairée.

-l'occultation totale d'une cellule implique une puissance dissipée atteinte dépendant de V_{br} en fonction de Q différente de la puissance dissipée maximale induite qu'elle est indépendante de V_{br} .

Pour les cellules de type B la puissance dissipée par la cellule occultée dans la configuration série parallèle pour différentes valeurs de n est illustrée dans la figure (III-9) :

-On note que la valeur de la puissance dissipée change pour des valeurs plus bas de Q à des faibles valeurs de R_{sh} .

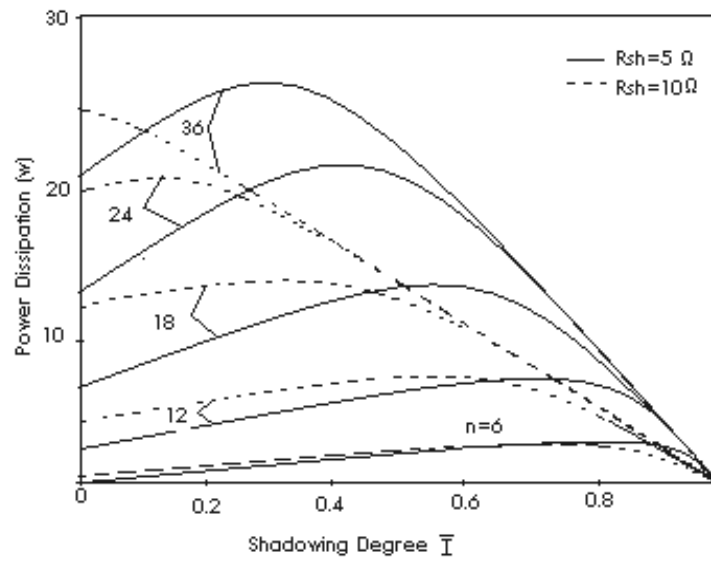


Figure (III-9) : La puissance dissipée par la cellule occultée dans la configuration série parallèle (type B) [25]

V-3-2-Connexic

La connexion parallèle série est représentée par la figure (III-10) :

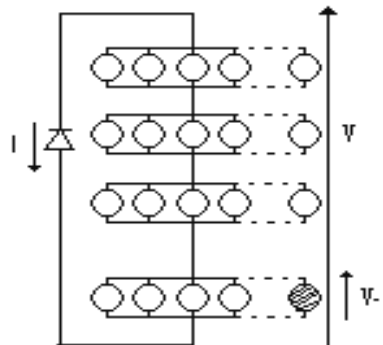


Figure (III-10) : Connexion parallèle série des cellules [25]

Les courbes de la figure III-11) représentent la puissance dissipée pour le type A, puisque les courbes obtenue pour le type B sont très similaire au type A, on se contentera d'étudier un seul type « A », dans les deux cas la puissance dissipée est plus grande pour (m-1) cellules éclairées que pour une cellule déficiente, le maximum de la puissance dissipée pour les cellules éclairées est toujours obtenue pour F=0 (occultation totale) ce maximum de puissance

décroit significativement si n et m augmentent; des valeurs raisonnables de la puissance dissipée sont obtenue pour n=24 et m=6.

Dans une configuration parallèle série, le pire des cas est si plus d'une cellule est totalement occultée (ou claquée) dans ce cas les cellules éclairées de la même branche doivent avoir un courant élevé .

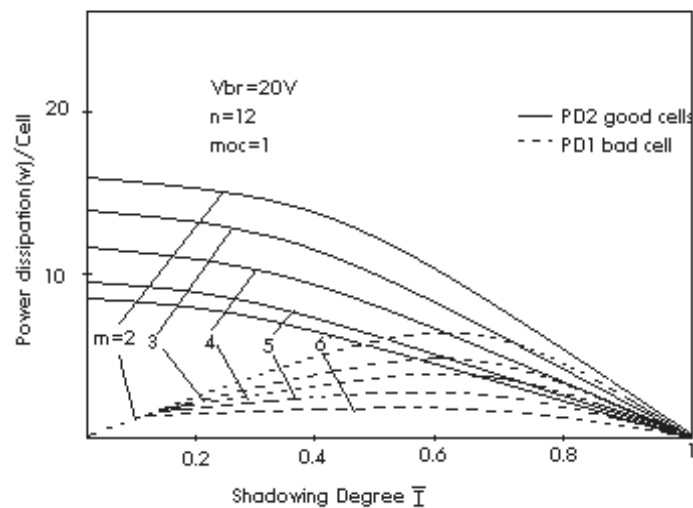


Figure (III-11) : La puissance dissipée de la mauvaise et des bonnes cellules, pour la même configuration parallèle série [25]

Cette classification entre les deux types A et B de la caractéristique inverse de la cellule photovoltaïque est identique à celle adoptée dans les normes internationales IEC-61215[46], et IEC-61646[47].

-Plus tard en 1986 Lopez peneda [48] fait une distinction parmi trois types de caractéristique inverse I (V) on appellera type C.

$$I = \left(I_{sc} - I_0 \left(\exp \frac{V}{mvt} - 1 \right) \right) M(V) - \frac{V}{R_{SH}} \quad (III-32)$$

Ou M (V) est la même dans l'expression (III-26) avec des conditions :

Si $V > 0$; $M(V) = 1$

Si $V < 0$; $M(V) > 1$

Si $V = V_b$; $M(V) = \infty$

Après l'examen critique des modèles pour les caractéristique de polarisation inverse des cellules solaires PV. On propose un modèle dans le quel, lève en partie les limitations précédentes.

Dans ce qui suit, on a étudié l'effet d'occultation (ou claquage) des cellules solaires dans une configuration parallèle série.

VII-Résolution de l'équation non linéaire I (V) :

La cellule solaire a été modulée par Lopez Peneda 1986 selon le modèle de type C représente dans les équations (III-26) (III-32).

On introduisant une nouvelle expression de la tension d'avalanche, cette dernière exprimée en fonction du degré d'occultation F, pour $V < 0$ et en négligeant le terme exp dans la partie inverse (III-28)

$$V_{br} = \left(\frac{(V-1)^x}{\frac{V-1}{R_{SH} I_{SC}} - \frac{m \alpha F}{m}} \right)^{\frac{1}{x}} \quad (III-33)$$

F : Taux d'occultation.

F=1 (icdairement total).

F=0 (obscurité totale).

Notre étude a été basée sur le troisième type de cellule C, ou on a introduit une variation du degré d'occultation dans la tension d'avalanche V_{br} (III-33), on fait une étude de trente six cellules de configuration parallèle série, on a basé notre étude sur des points suivants :

- L'influence de la résistance shunt sur la caractéristique de la cellule solaire I (V)
- L'influence de l'occultation sur les caractéristiques I (-V) d'une cellule solaire
- L'influence de l'occultation sur la puissance dissipée.
- L'influence du nombre de cellule occultée sur la puissance dissipée.
- De nombre de cellule occulté pour que la puissance dissipée soit maximale.

Nous avons réalisé une simulation numérique d'un modèle tenant compte de tous les paramètres cités. Pour la résolution de l'équation non linéaire notre choix a porté sur la méthode de Dichotomie qui s'avère être la plus adéquate [21].

VII-1-L'influence de l'occultation sur la puissance dissipée :

Pour les cellules de type C l'équation (III-28) devient :

$$\left(\frac{m - moc}{m} + \frac{moc}{m} (F) \right) = \left(1 - \frac{I_0}{I_{SC}} \left(\exp \frac{V}{(n-1)AV_T} - 1 \right) \right) \frac{1}{M(V-1)} - \frac{(V-1)}{R_{sh}I_{SC}} \quad (\text{III-34})$$

- m : nombre des branches en parallèle.
- moc : nombre des cellules occultées.
- n : nombre totale des cellules dans le module photovoltaïque.
- F : le degré d'occultation.

La puissance dissipée par la cellule occultée est obtenue à partir de l'équation :

$$P_{D1}(V) = (V-1)(F)I_{SC}M(V-1) + \frac{(V-1)^2}{R_{sh}} \quad (\text{III-35})$$

La puissance dissipée par la cellule éclairée dans la branche parallèle est obtenue à partir de l'équation :

$$P_{D2}(V) = (V-1)I_{SC}M(V-1) + \frac{(V-1)^2}{R_{sh}} \quad (\text{III-36})$$

VII-2-Nombre des cellules occultées critique pour que la puissance dissipée soit maximum :

D'après la simulation du nouveau modèle des cellules de type C et partir de la configuration parallèle série qu'on a utilisé (m=6 branches parallèle) on trouve que le nombre des cellules occultées pour que la puissance dissipée soit maximum est :

$$moc = m - 1$$

Conclusion :

Sous les conditions AM1, la caractéristique courant tension $I(V)$ nous renseigne en général sur le comportement de la cellule solaire.

Dans notre étude, nous avons proposé un nouveau modèle analytique pour un module en groupement parallèle série des cellules au lieu des connections série conventionnelles, cela en tenant compte des nouvelles variations de la tension d'avalanche en fonction de degré d'occultation.

On remarque que la majorité des problèmes qui se posent avec les cellules solaires soit due à des cellules occultées dans un module, et pour cette raison nous avons déterminé numériquement l'influence du taux d'occultation sur la puissance dissipée puis le nombre de cellules critique pour que la puissance dissipée soit maximum.

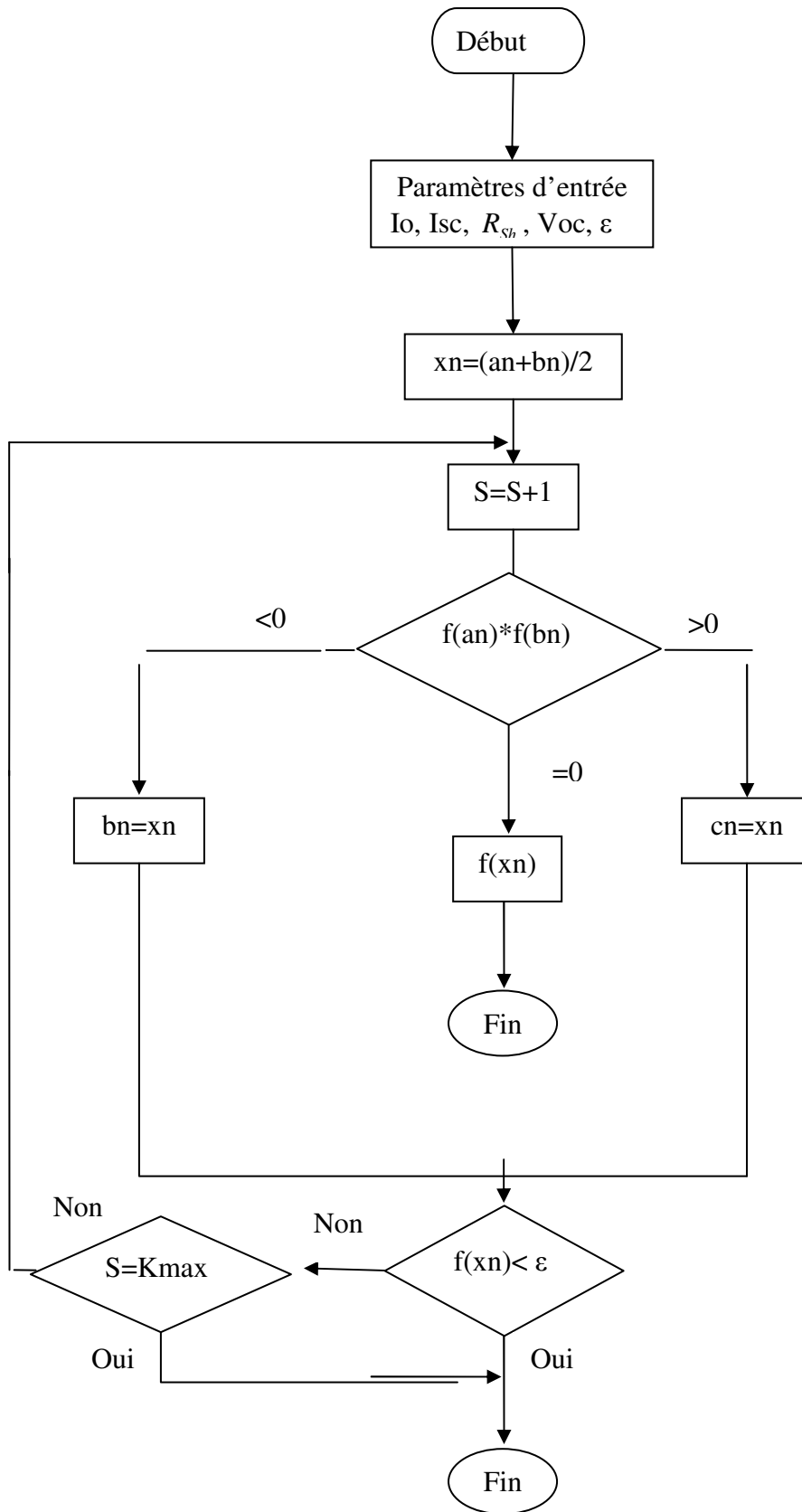
CHAPITRE IV

ETUDE DES COURBES ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons et commenterons les différents résultats obtenus lors de la simulation numérique du nouveau modèle élaboré précédemment .Une comparaison avec la littérature sera réalisé.

L'organigramme :



II-Résultats :

A partir de la simulation réalisée de notre modèle numérique d'une cellule solaire, par la méthode de Dichotomie, 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 ces 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 supérieurs 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).

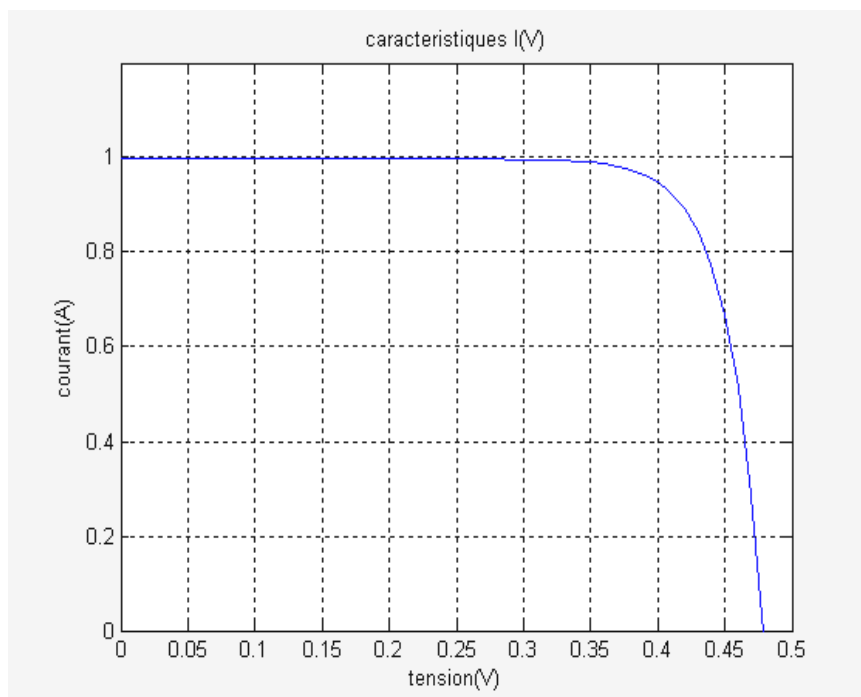


Figure (IV-1) : La caractéristique courant-tension d'une cellule solaire

II-2-L'influence de la résistance Rsh :

La figure(IV-2) montre l'influence de la résistance shunt Rsh sur la caractéristique courant- tension ,l'influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme générateur à courant constant,lorsque Rsh augmente. On trouve donc que pour augmenter la puissance de la cellule photovoltaïque il faut que Rsh ne soit pas trop grande, d'où la nécessité d'optimiser Rsh

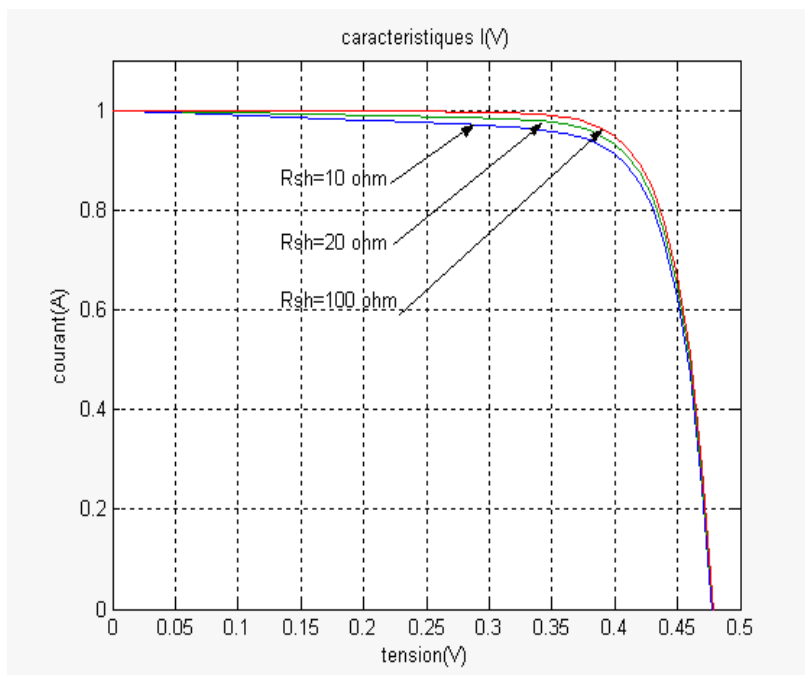


Figure (IV-2) : L'influence de la résistance shunt sur les caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire

II-3-L'influence de taux d'occultation F :

Considérons un module de trente six cellules (connexion parallèle série) ,avec une cellule occultée.

La figure (IV-3) représente la courbe I (-V) pour une cellule occultée et le taux d'occultation : 0 ; 0.25 ; 0.5 ; 0.75 ; 1. pour une valeur de la résistance shunt $R_{sh}=100$ ohm.

Il y a également un effet dû à l'occultation partielle de la cellule, cela est un déplacement de point de la tension inverse dirigé vers les valeurs de tension plus grandes mener à des grandes dissipations de puissance (la tension inverse augmente avec l'augmentation de l'occultation) et que même les petits ombres peuvent affectés sur la tension inverse. (Rendement du système).

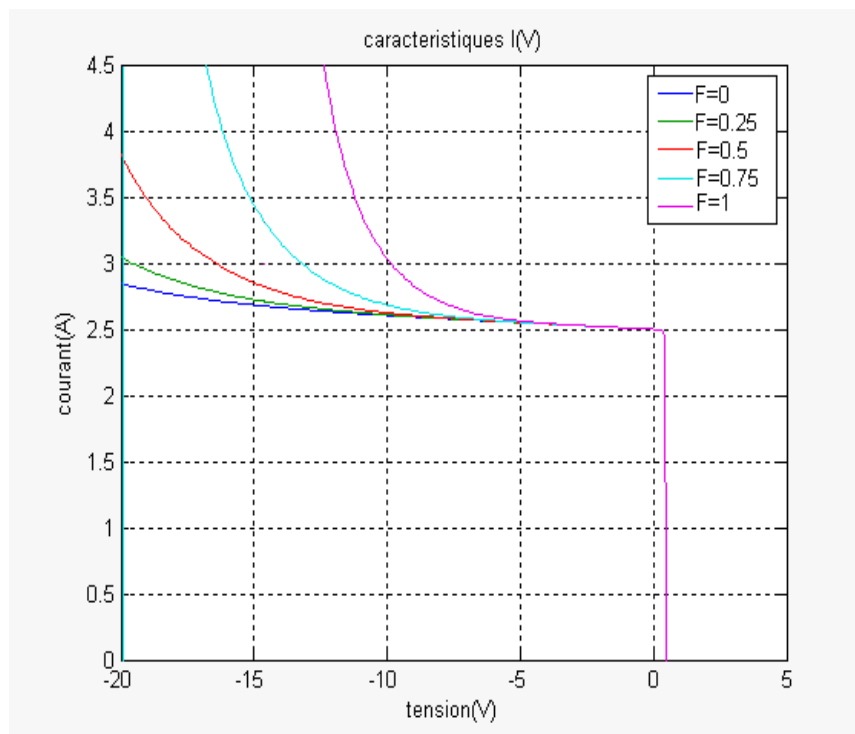


Figure (IV-3) :L'influence de taux d'occultation sur la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire

II-4-La puissance dissipée :

II-4-1-L'influence de l'occultation sur la puissance dissipée :

La puissance dissipée dans un module de trente six connectées en parallèle série par les cellules éclairées et la cellule déficiente de même parallèle est illustrée dans la figure (VI-5).

- On remarque que la puissance dissipée par des (m-1) cellules éclairées est grande que celle par la cellule déficiente.

L'influence de l'occultation sur la puissance dissipée est représentée par la figure (VI-6) avec deux valeurs de la résistance shunt, une égale à 100 ohms et l'autre est la résistance shunt optimale qui est en fonction de la résistance caractéristique R_{ch} , ($R_{sh}=10 \cdot R_{ch}$). la puissance dissipée par les cellules éclairées augmente avec l'augmentation du degré d'occultation dans la cellule déficiente.

- La puissance dissipée maximum par les cellules éclairées est obtenue pour $F=0$ (occultation totale) de la cellule déficiente.

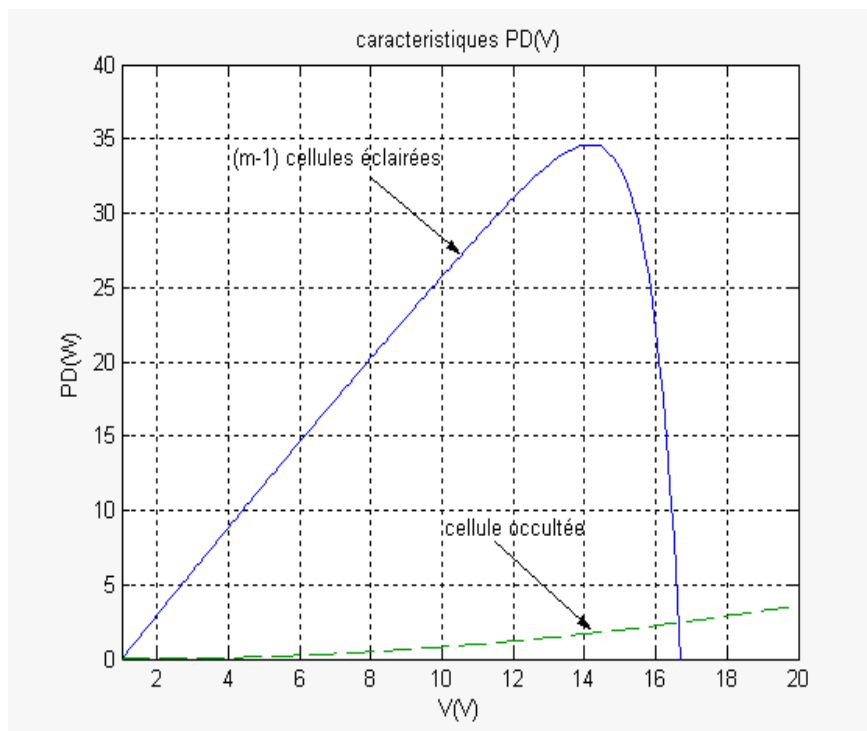


Figure (III-5) : La puissance dissipée par la mauvaise et les cellules éclairées respectivement

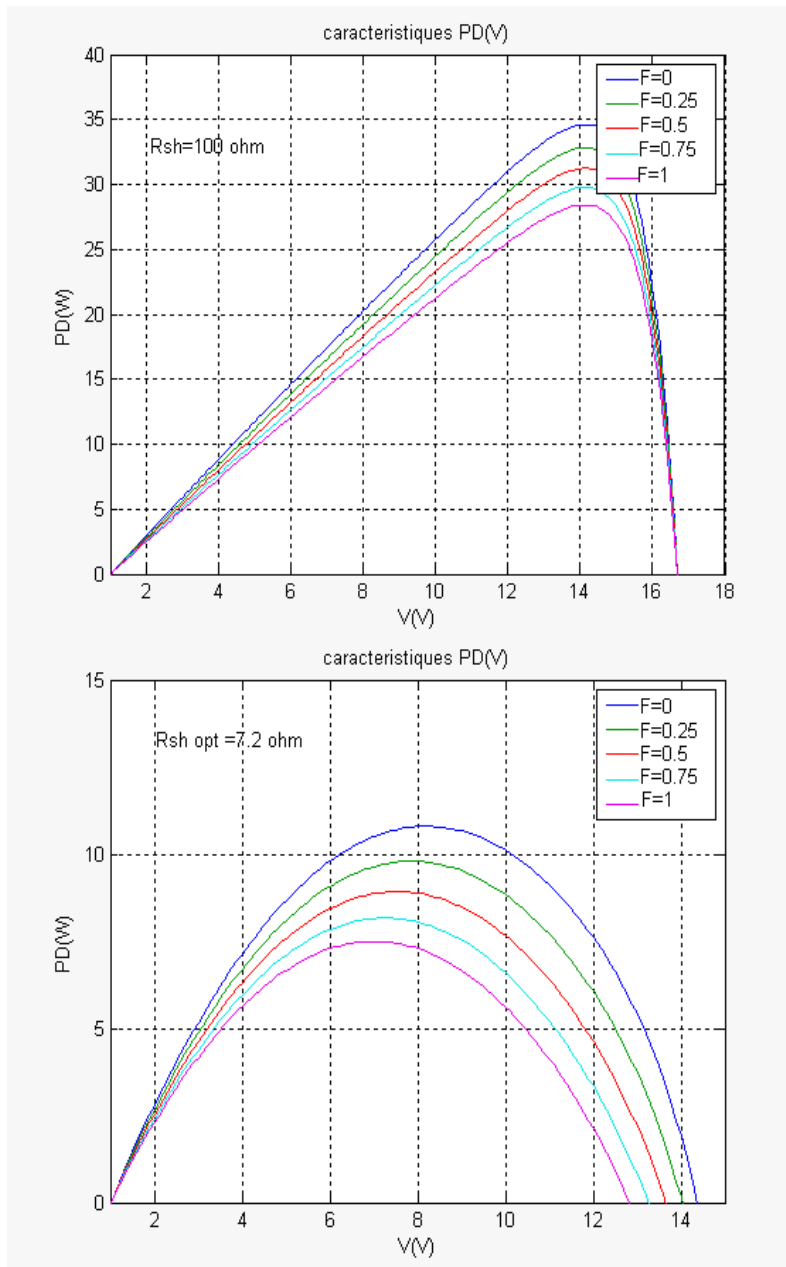


Figure (III-6) : L'influence de l'occultation sur la puissance dissipée pour (m-1) cellules éclairées

II-4-2-L'influence la résistance shunt sur la puissance dissipée :

La figure (IV-7) met en évidence l'influence de la résistance shunt sur la puissance dissipée dont la cellule déficiente est occultée totalement .On remarque :

- La résistance shunt a un effet très important sur la puissance dissipée ; la puissance dissipée augmente avec l'augmentation de la résistance shunt et atteint leur maximum pour une valeur de Rsh supérieur à 100 ohm.

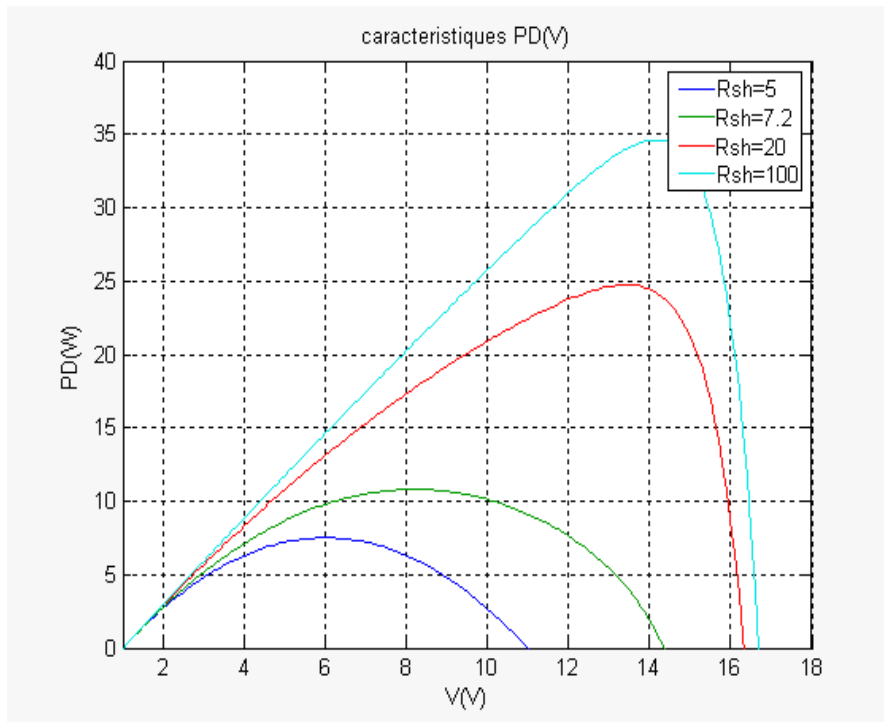


Figure (III-7) : L'influence de la résistance shunt sur la puissance dissipée

II-4-3-L'influence de nombre de cellule occultée sur la puissance dissipée :

La figure (III-8) représente l'influence de nombre des cellules occultées sur la puissance dissipée avec $F=0$ (occultation totale des cellules), on prend deux cas des résistances shunt, une la résistance shunt optimale et l'autre de valeur égale à 100Ω respectivement .On remarque que :

- La puissance dissipée augmente avec l'augmentation de nombre de cellule occultée. Et atteint leur valeur maximale pour $moc=5$.

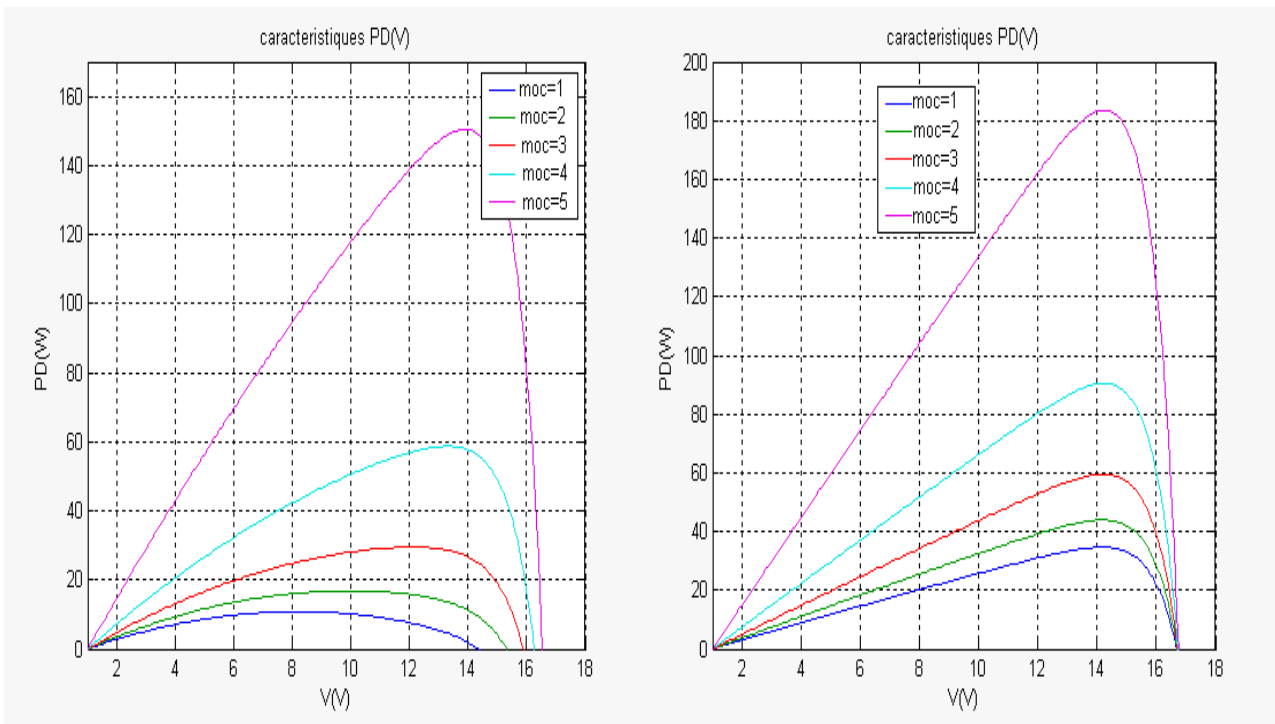


Figure (III-8) : L'influence de nombre des cellules occultée sur la puissance dissipée de (m-1) cellules éclairées

II-4-4 : La puissance dissipée maximale :

La figure (III-9) représente la puissance dissipée maximale obtenue pour cinq cellules totalement occultées dans un module de trente six cellules connectées en parallèle série (moc=5), et pour une valeur de la résistance shunt optimale. Le nombre des cellules occultées critiques pour que la puissance dissipée est maximale : $\text{moc} = m - 1$ (nombre des cellules occultées égal à nombre des chaînes parallèles -1)

IV-4-4 La puissance dissipée maximale :

La figure (III-9) représente la puissance dissipée maximale obtenue pour cinq cellules totalement occultées dans un module de trente six cellules connectées en parallèle série (moc=5) ; $\text{moc} = m - 1$, pour une valeur de la résistance optimale $R_{sh} = 7.2 \text{ ohm}$.
 $\text{moc} = m - 1$; le nombre des cellules occultées critique pour que la puissance dissipée soit maximale ($\text{moc} = \text{nombre des chaînes en parallèle} - 1$)

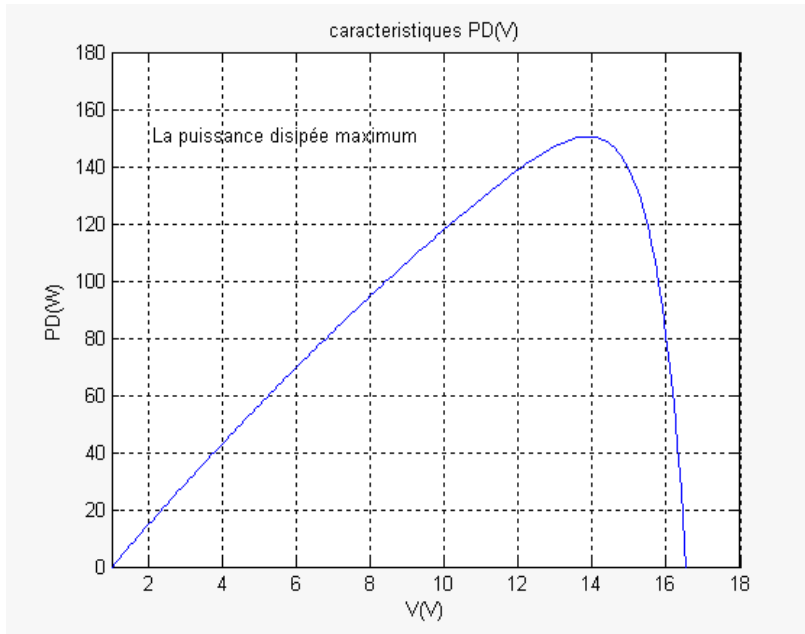


Figure (III-9) : la puissance dissipée maximale

Conclusion :

Cette étude a été réalisée en vue de modéliser la puissance dissipée par rapport au taux d'occultation d'une au de plusieurs cellules.

La tension d'avalanche et la résistance shunt joue également un rôle important dans la dissipation de cette puissance.

La puissance dissipée n'apparaît pas seulement au niveau de la cellule déficiente, mais également au niveau des autres cellules dans les (m-1) chaînes parallèles et de façon plus important.

-On a fait une comparaison entre les trois types des cellules :

A une tension inverse $V < 15$ Volts la courbe I (-V) de notre modèle à une caractéristique similaire de celle obtenue dans les cellules de type B.

Quand la tension inverse $V \geq 15$ Volts notre modèle prend l'allure des cellules de type A, ce dernier a une tension inverse maximale supérieure de celle de notre modèle.

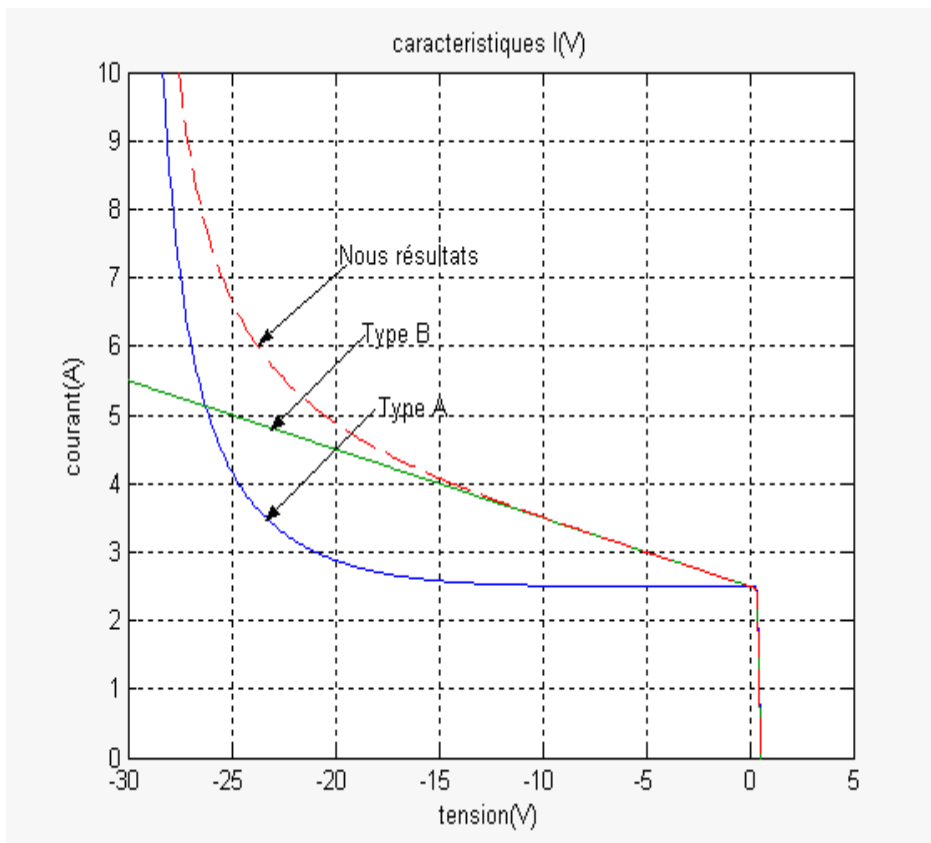


Figure (III-10) : Caractéristique I (-V) des trois types des cellules

- On a fait une autre comparaison entre les trois types des cellules,
 Pour $V < 4$ Volts la courbe de la puissance dissipée de notre modèle à un caractéristique similaire celle obtenue dans les cellules de type B.
 Pour $V \geq 4$ Volts, la courbe de la puissance dissipée de notre modèle prend l'allure de celle des cellules de type A, ce dernier a une puissance dissipée maximale plus grande à celle de notre modèle (à cause de l'effet de la résistance shunt qui apparaît dans notre modèle).

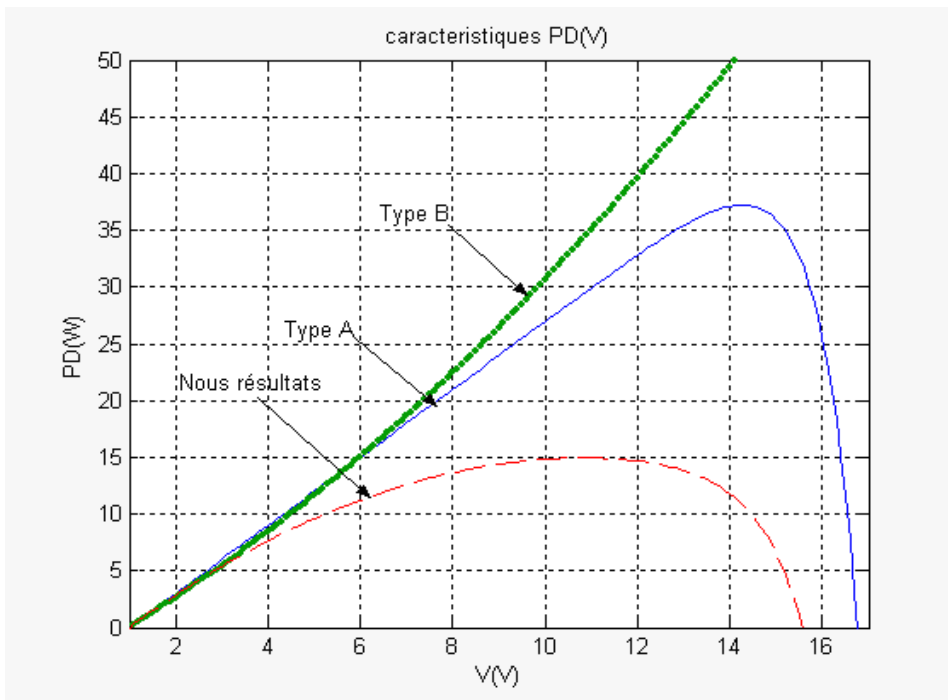


Figure (III-11) : la puissance dissipé maximale pour les trois types des cellules

Partie expérimentale :

Introduction :

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

Procédures d'installation :

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

- Les modules (références, Assemblage et câblage)
- Montage des structures
- Câblage de liaison

I-1- Les modules :

Références :

Module photovoltaïque poly cristallin 12volt en puissance optimum									
(CS4-55WATT)									
puissance	Intensité En charge	Tension En charge	Intensité En CC	Tension En CO	longueur	largeur	épaisseur	poids	PrixT,DA HTVA
55 watts	3.2A	17.2V	3.48A	21.6V	1080mm	290mm	540mm	7Kg	3million 500 centimes

Résultat d'expérience :

II-1-Mesure de l'ensoleillement :

Les figures suivantes (IV-12,IV-13,IV-14,IV-15,IV-16,IV-17,IV-18,IV-19) représentent les courbes d'expérience, ces dernières montrent la variation de l'ensoleillement durant deux jours (12/05/2008) et (21/06/2008) au solstice d'été. Nous avons pris ces courbes chaque dix secondes à partir de 08 :00 jusqu'à 17:00.

L'ensoleillement dépend de quatre saisons (été, printemps, hiver, automne), le temps de journée (matin ou soir) et la nature de ciel (clair, nuage).

Pour la date 12/05/2008 (printemps) et le ciel clair, l'ensoleillement est prendre une valeur maximale de 2552 W/m^2 à $12^{\text{h}} : 32 :00$ et atteint une valeur minimale de 123 W/m^2 à $16^{\text{h}} : 51 :10$.

Pour la date 21/06/2008 (solstice d'été avec le ciel clair, l'ensoleillement est augmenter jusqu' a 2591 W/m^2 à $12^{\text{h}} : 34 :30$, et prend une valeur 386 W/m^2 $17^{\text{h}} : 08 :30$ du soir.

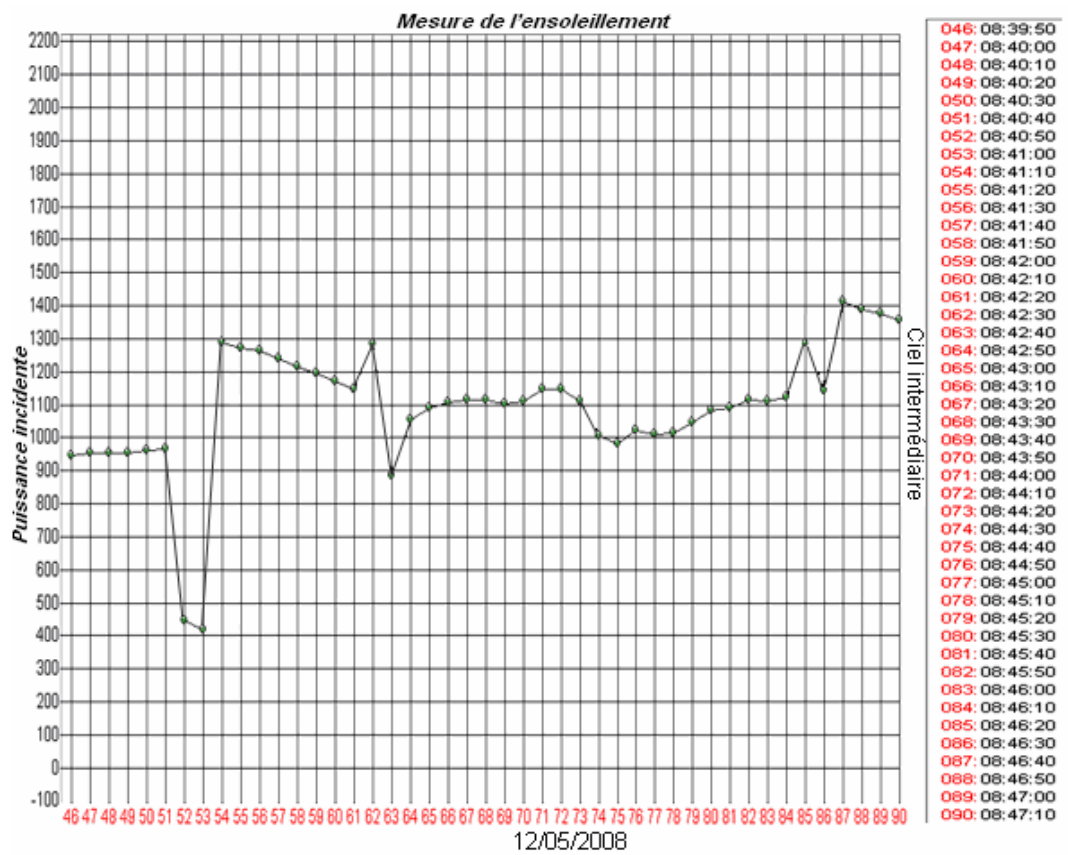
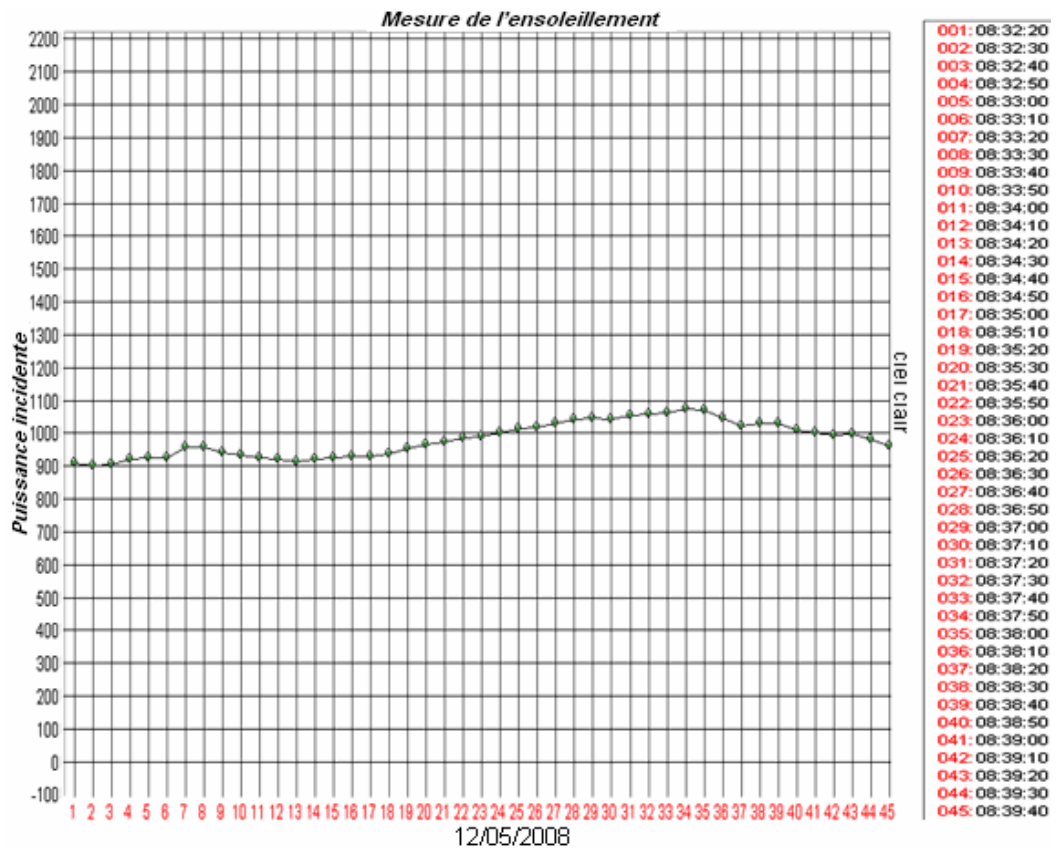


Figure (IV.12) : L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [08:32 – 08:47]

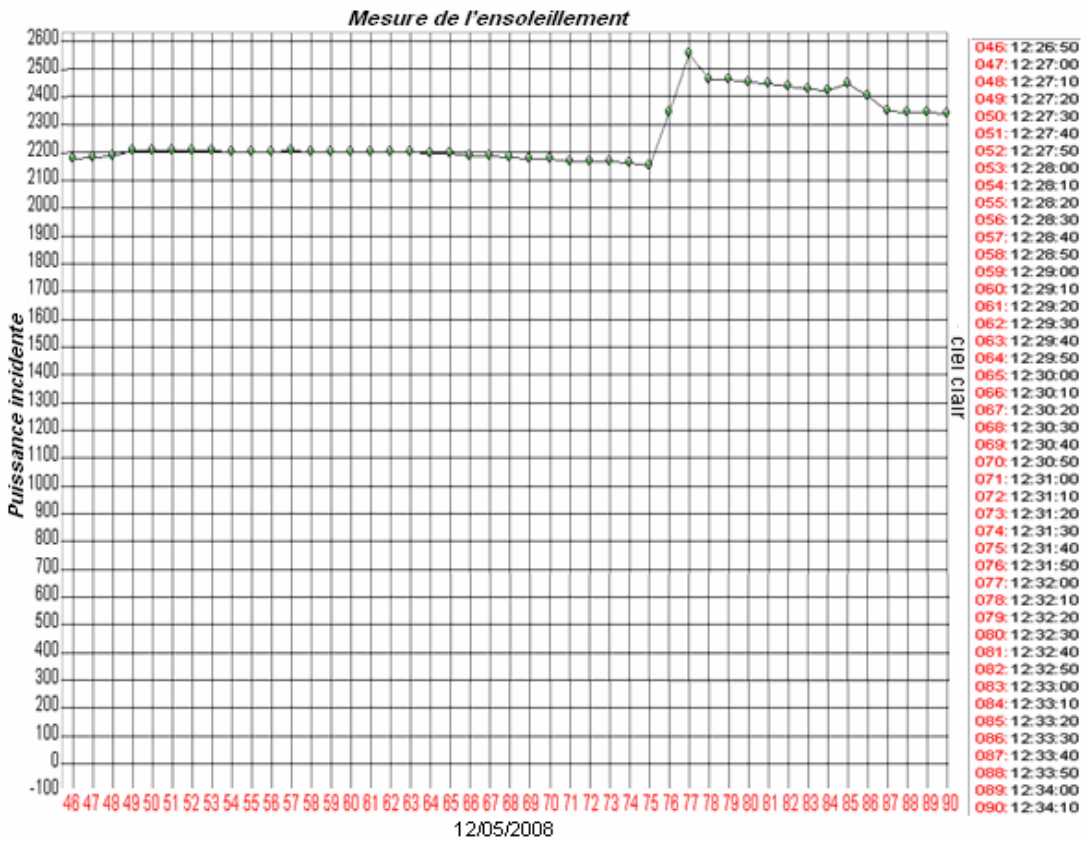
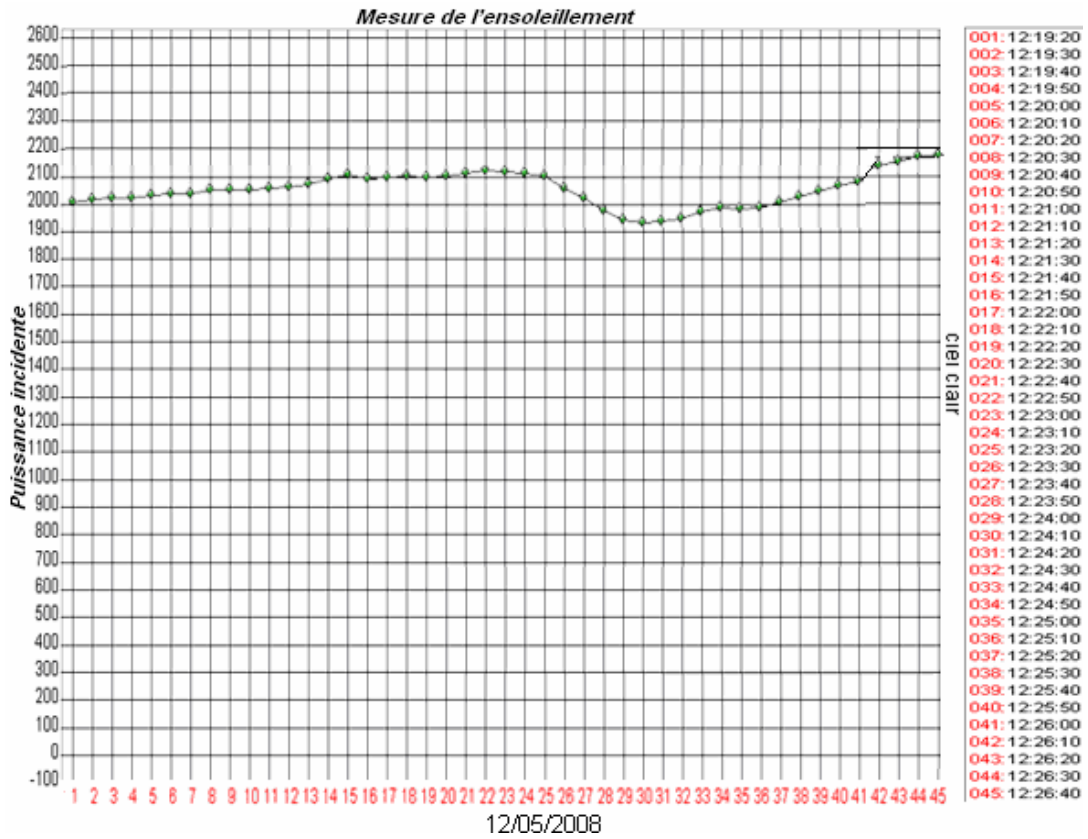


Figure (IV-13) : L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [12:19 – 12:34]

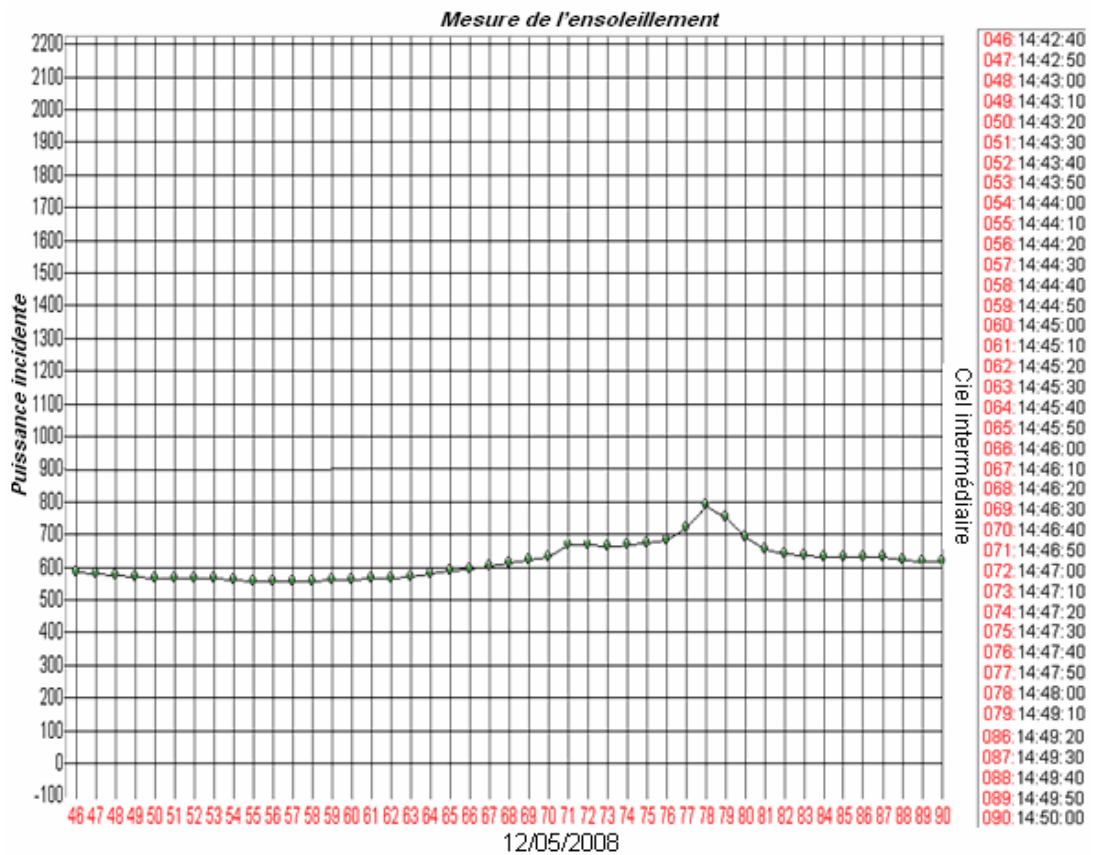
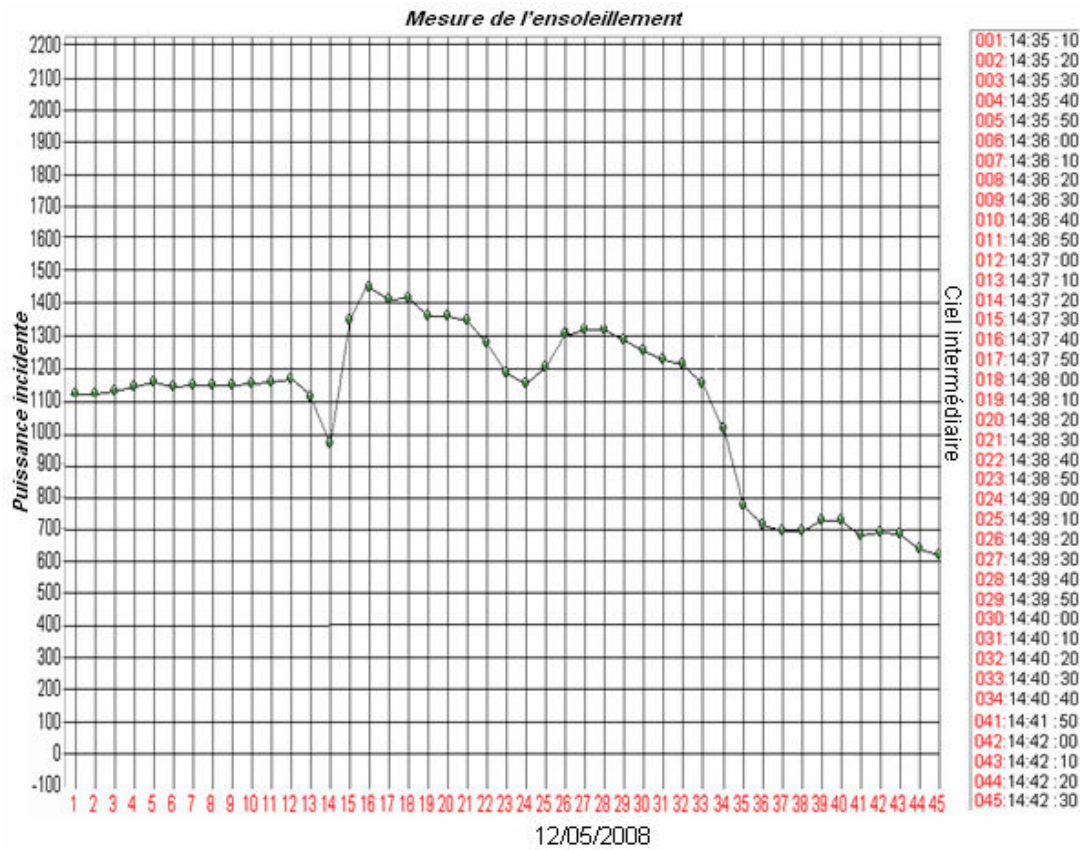


Figure (IV-14) : L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [14:35 –14:50]

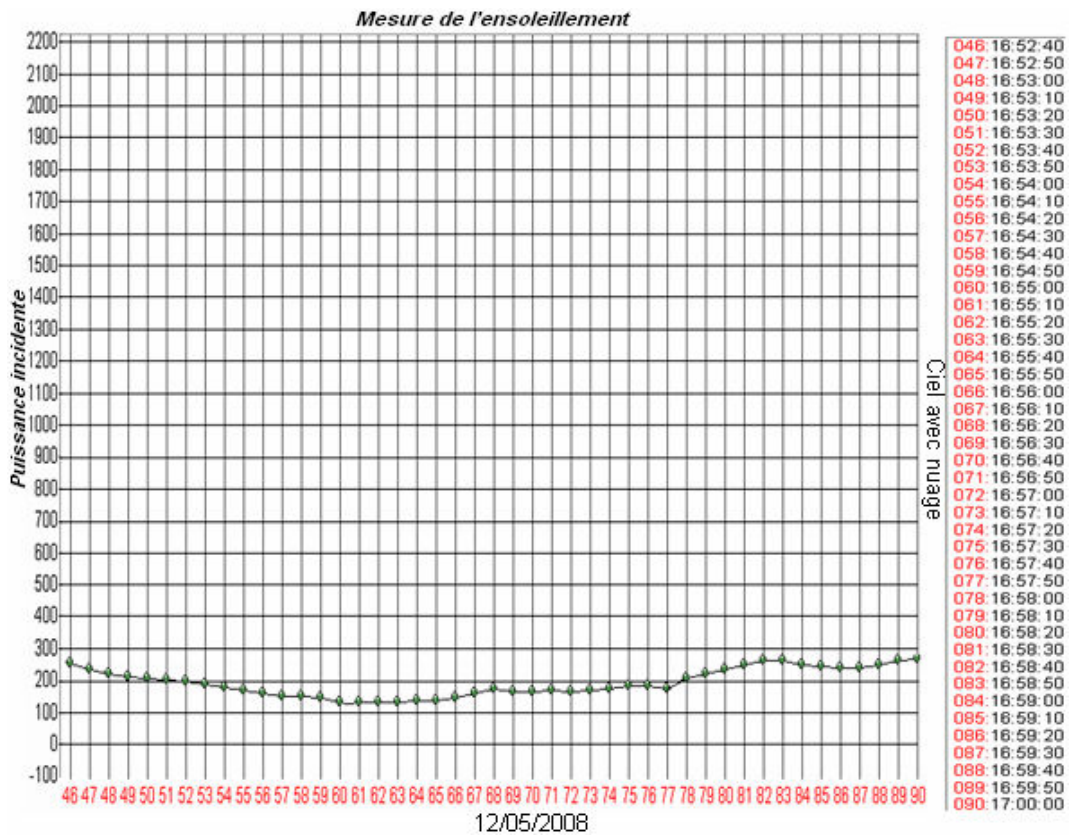
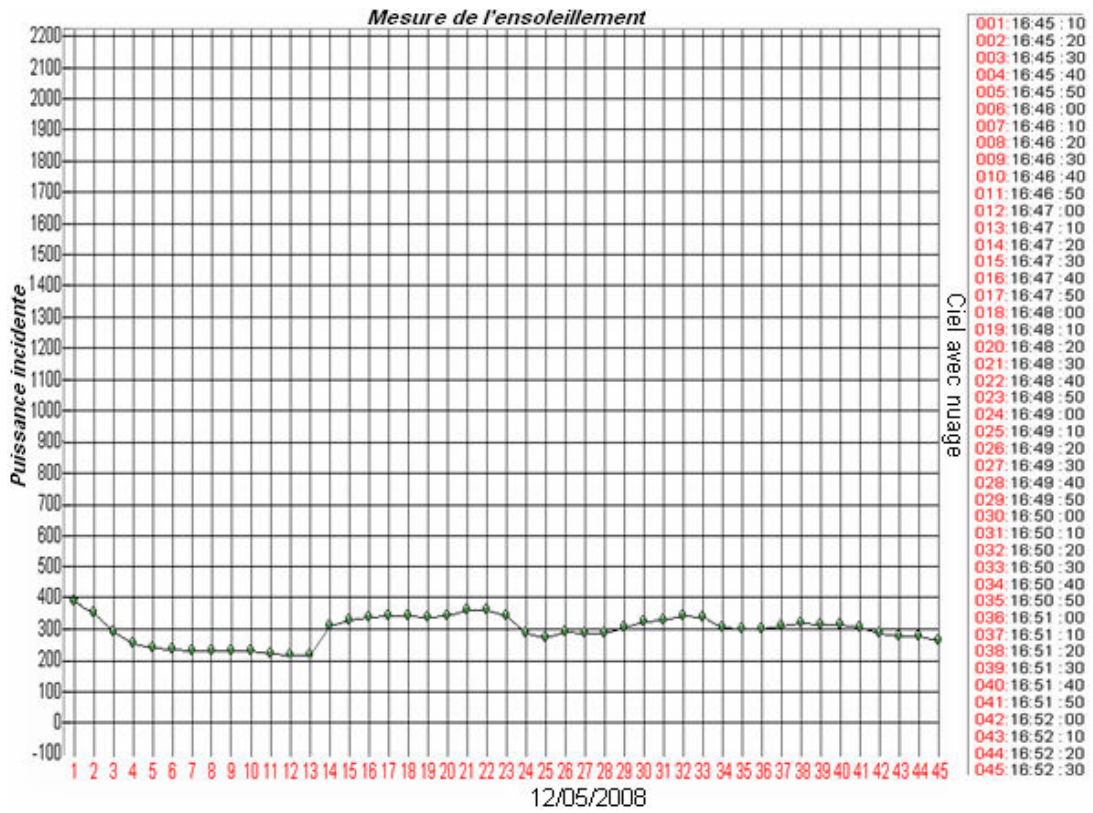


Figure (IV-15) :L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [16:45 – 17:00]

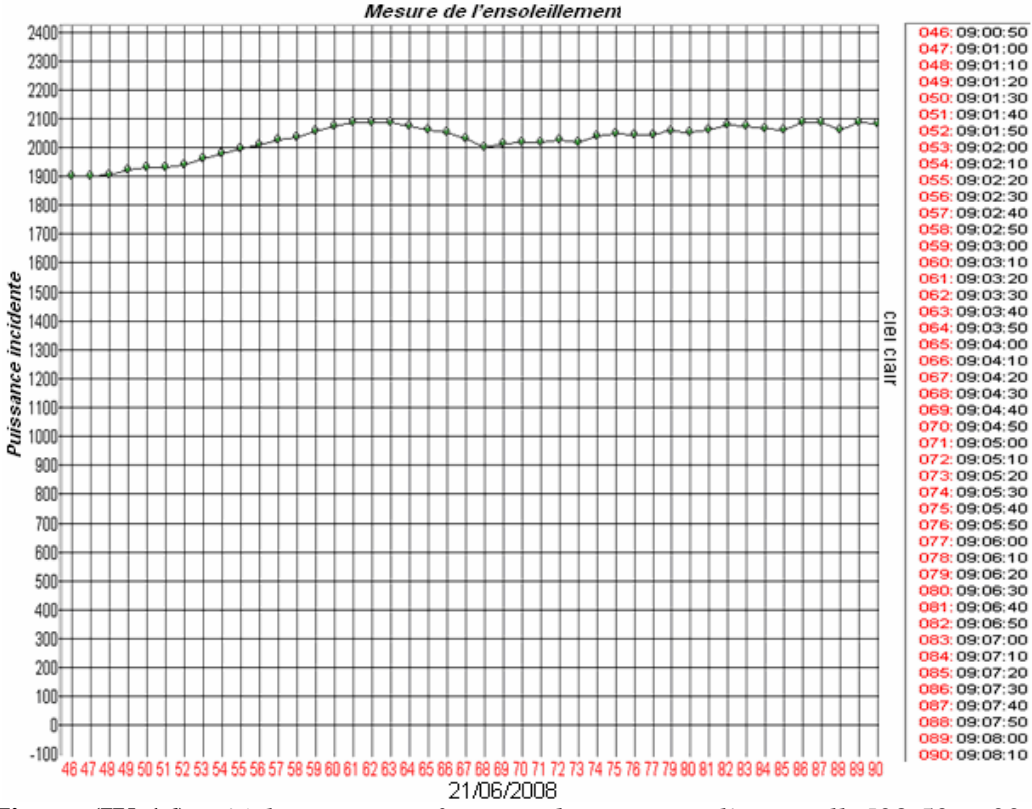
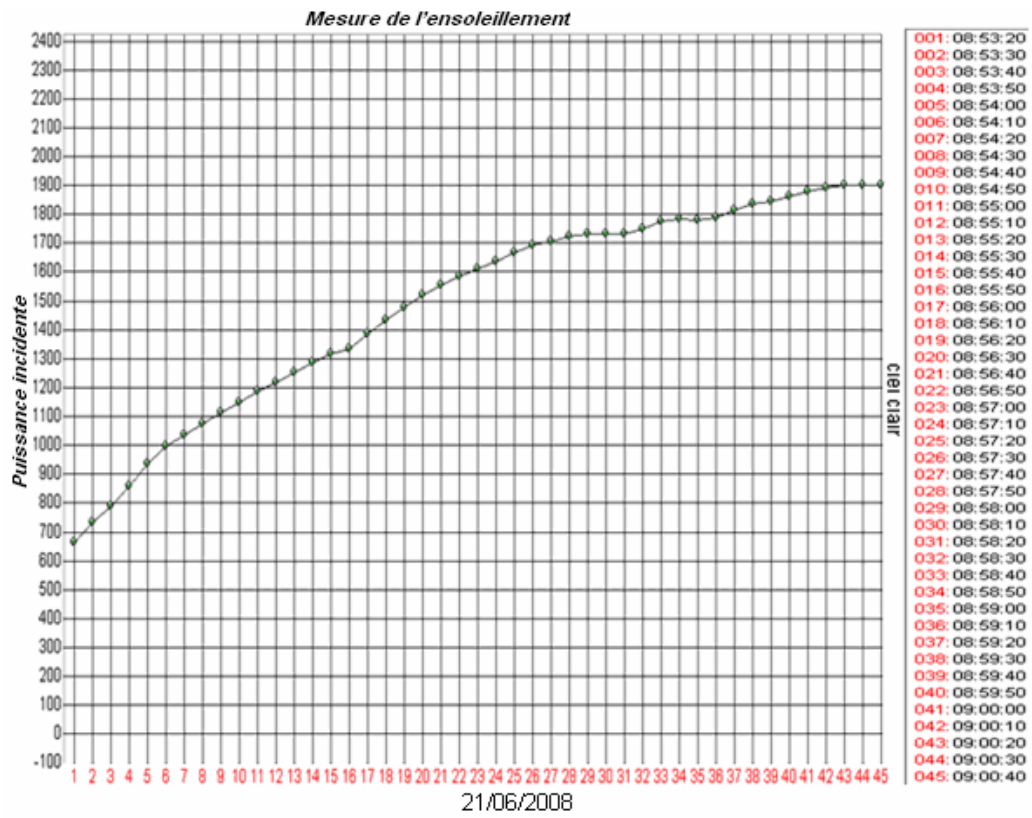


Figure (IV-16) : L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [08:53 – 09:08]

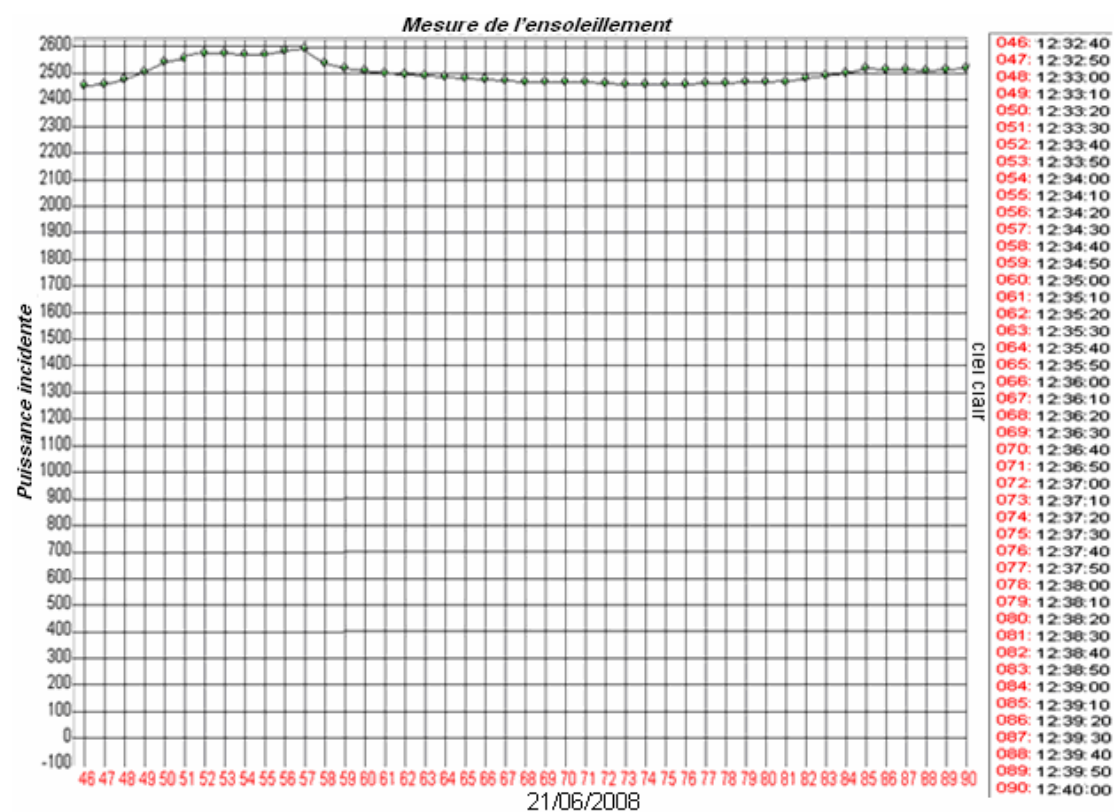
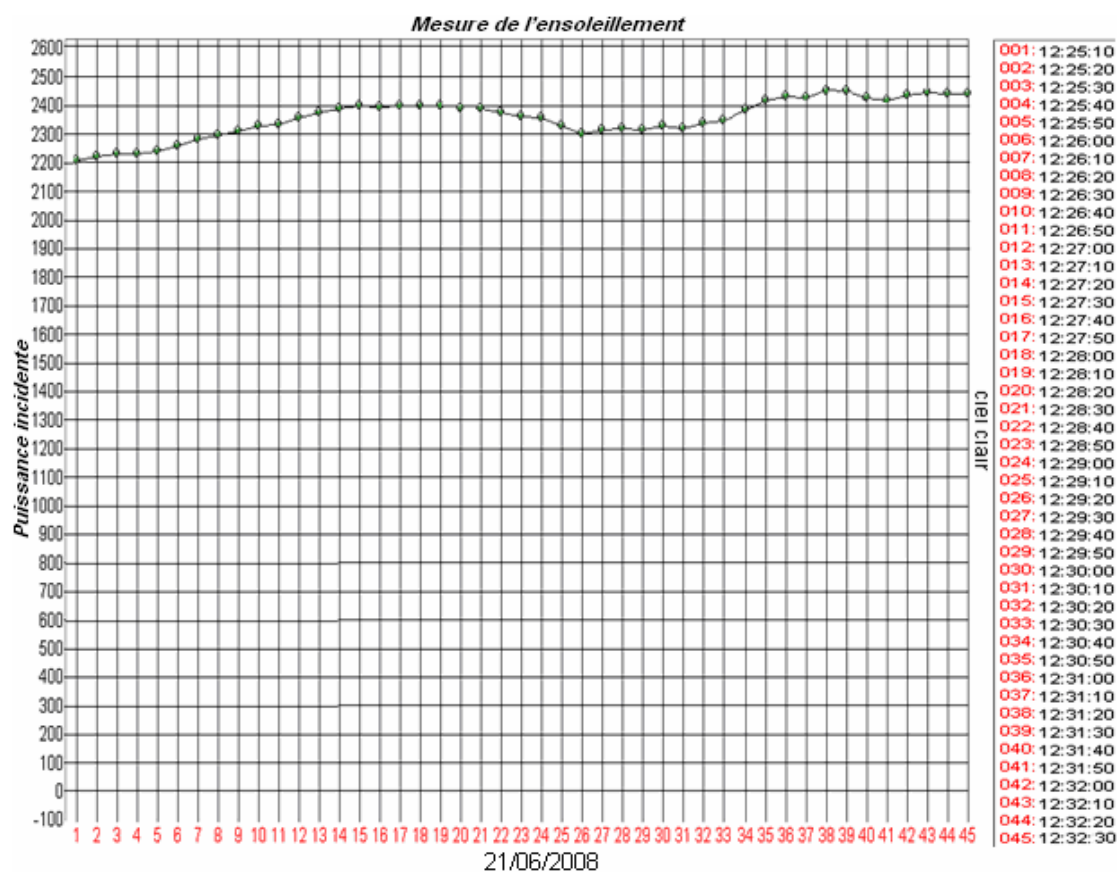


Figure (IV-17) : L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [12:25 –12:40]

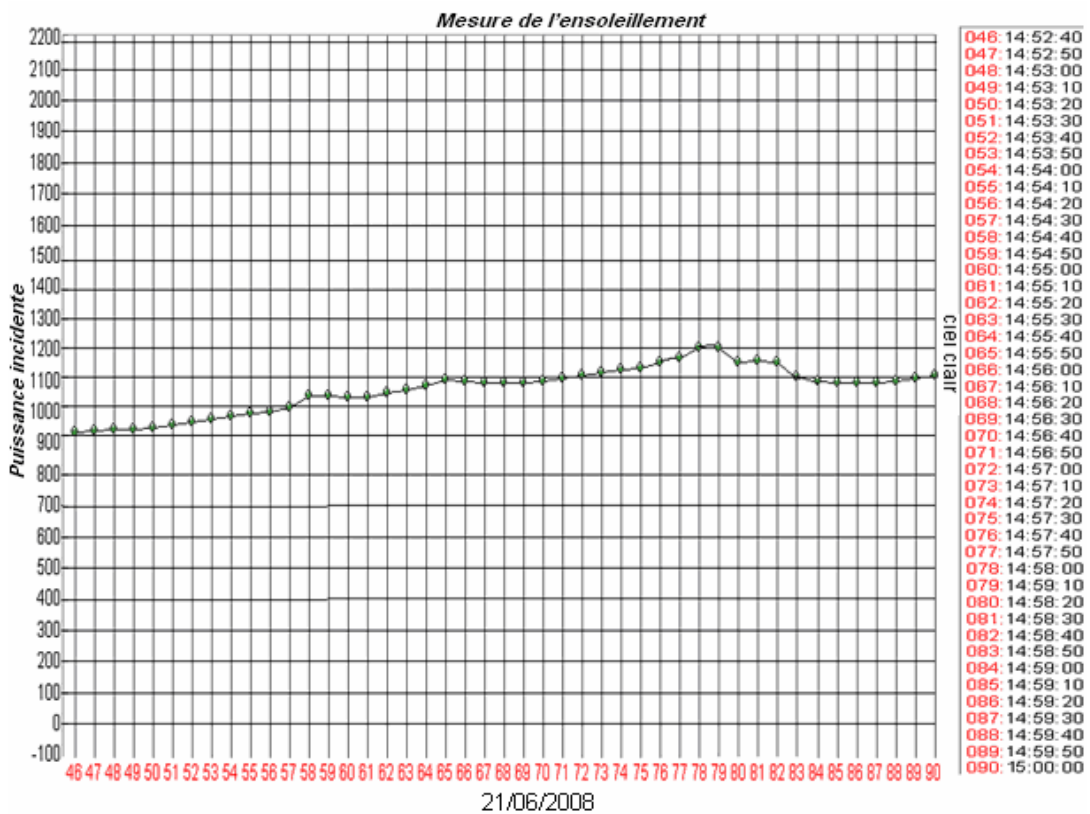


Fig. (IV-18) : L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [14:45 – 15:00]

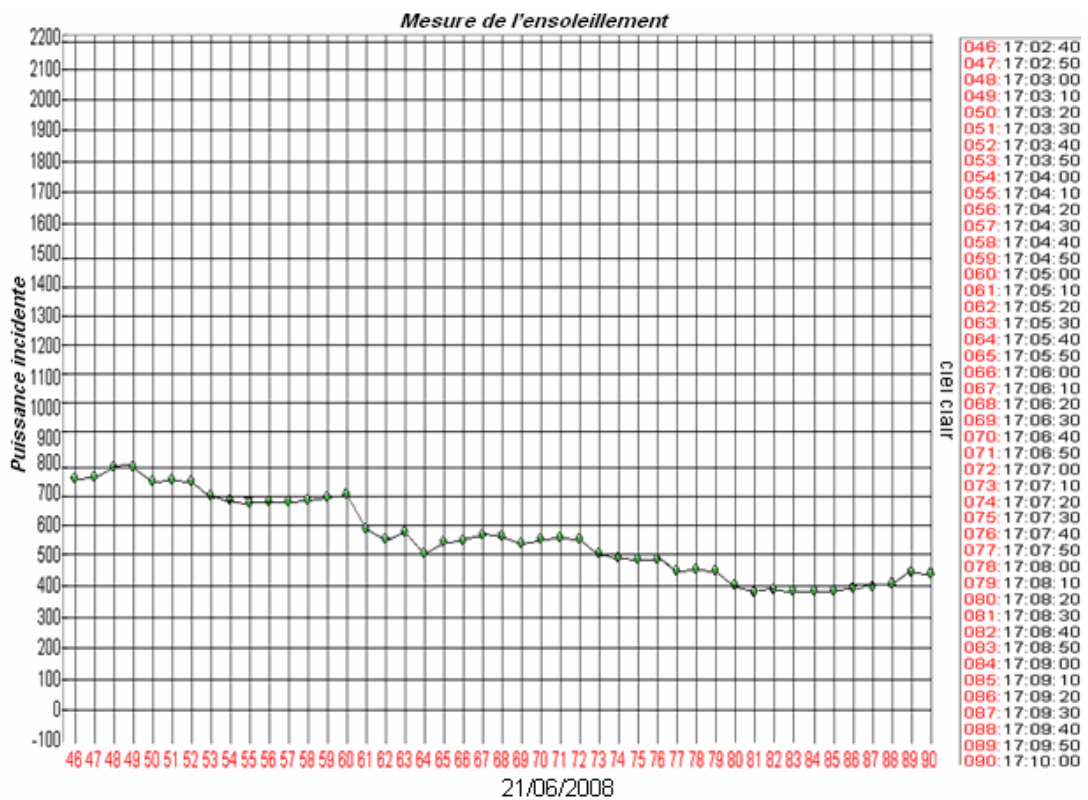
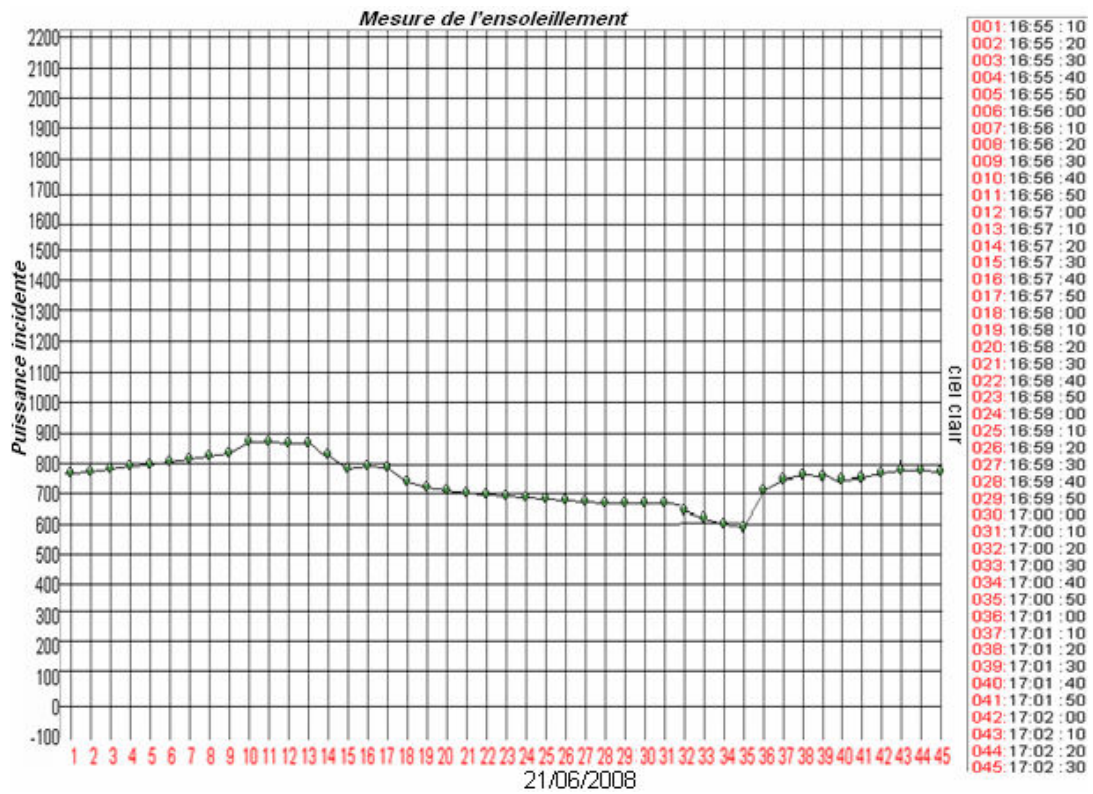


Fig. (IV-19) : L'éclairement en fonction du temps sur l'intervalle [16:55 – 17:10]

II-2-Courbe I (V) d'une cellule solaire :

Une étude expérimentale a été faite, elle consiste à tracer la caractéristique courant tension du module photovoltaïque PWX500 son rendement égal à 13%. [49]

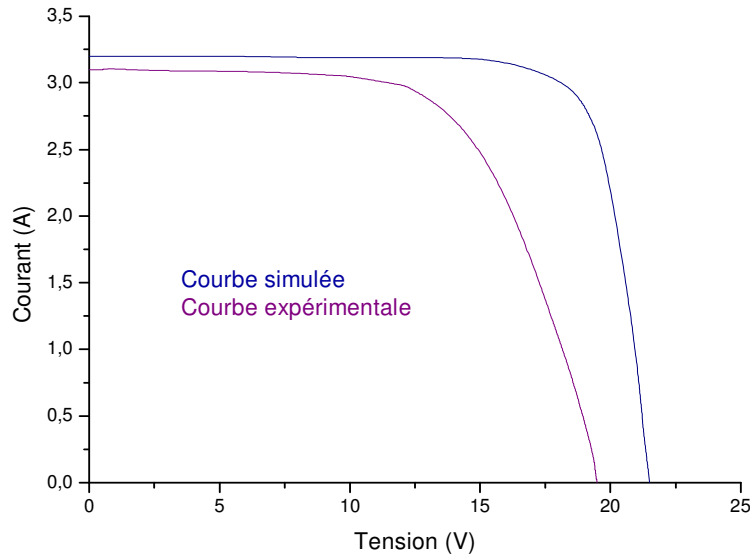


Figure (IV-20) : Caractéristique I (V) du module PWX500

D'après la figure (IV-20) on trouve :

$$I_{CC}=3.11 \text{ A}$$

$$V_{CO}=19.8 \text{ V}$$

-Courbes expérimentales de la puissance :

- La puissance maximale : $P_{max} = I_m * V_m = 2.8 * 13.8 = 38.64 \text{ Watt}$.
- Le facteur de forme $FF = \frac{V_m I_m}{I_{cc} V_{oc}} = 0.637$.
- La puissance absorbée par le module : 343.44 Watt .
- Le rendement $\eta = \frac{P_{max}}{P_{incidente}} = I_{cc} V_{cc} \frac{FF}{P_{inc}} = 0.1129$

-Courbes simulée de la puissance :

- La puissance maximale $P_{max} = 53 \text{ Watt}$.
- Le rendement $\eta = 15.4\%$.

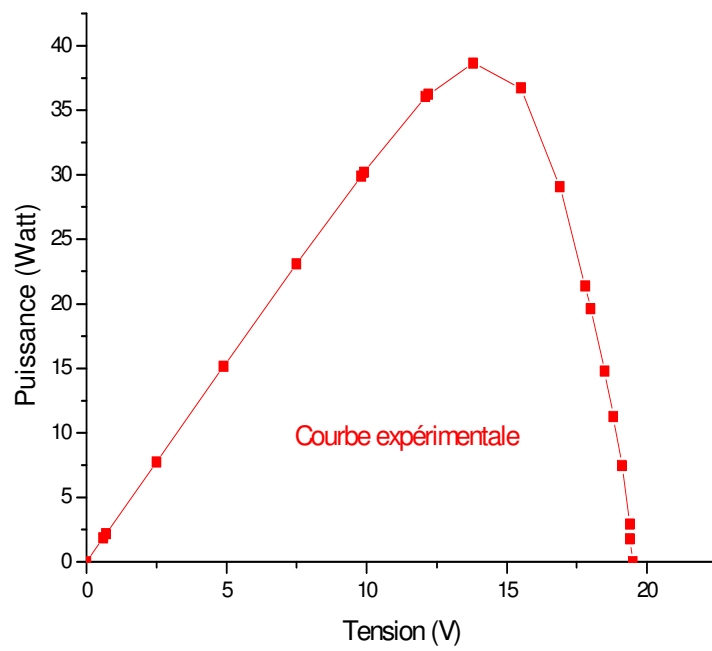


Figure (IV-21) : La puissance expérimentale du Module PWX 500

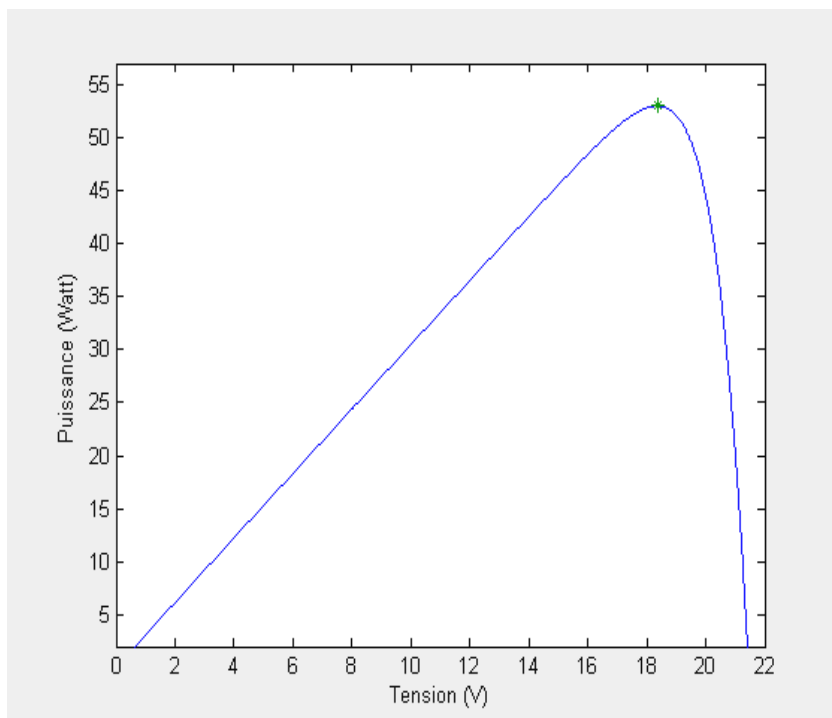


Figure (IV-22) : La puissance simulée du Module PWX 500

Nous constatons une erreur de 26% au niveau du rendement et de 27% pour la puissance, nous pouvons estimer que cet écart n'est pas trop grand. Il est dû aux erreurs de manipulation (erreur accidentelle, de lecture), de construction (classe des appareils), etc....

II-3-Occultation partielle d'une cellule :

On réalise une occultation partielle à l'aide d'un cache sur un module de neuf cellules en série, module encapsulé nous permettant de recouvrir une cellule à : 25%, 50%, 75%, 100%. Les caractéristiques sont mesurées et la puissance optimale est déterminée, on prend une résistance shunt de valeur : $R_{sh}=7R_{ch}$.

Le module est illuminé complètement: $F=1$.

On trouve que la puissance optimale diminue lorsque l'occultation augmente.

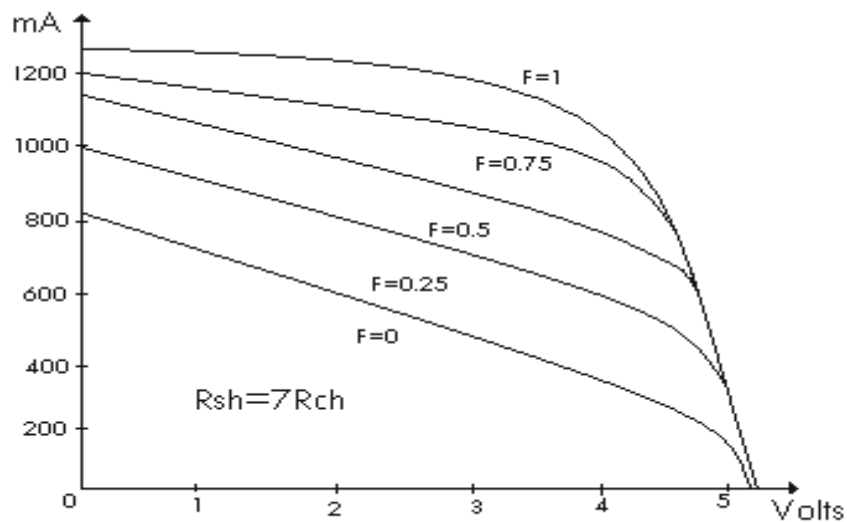


Figure (IV-23) : module de neuf cellules en série, module encapsulé

*CONCLUSION
GENERALE*

Conclusion générale

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.

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 Dichotomie par souci de convergence et de non complexité.

Pour un éclairement donnée à une température ambiante la caractéristique courant-tension $I(V)$ nous renseigne sur le comportement de la cellule solaire. La cellule solaire se comporte comme un générateur dont la tension à ses bornes et le courant qu'il débite représentent la caractéristique $I(V)$. Cette caractéristique influencée par plusieurs facteurs tels que : la température, le flux lumineux, la résistance shunt, la résistance série.

On a constater d'après les courbes obtenue dans le deuxième chapitre que dans l'association des cellules en série, pour un courant constant la tension augment, et que dans l'association des cellules en parallèle, pour une tension constante le courant augmente.

La cellule occultée peut subir une tension inverse trop élevée ou être traversée par un courant trop important il peut résulter des dégradations irréversibles pouvant entraîner la district ion de toute une station. Donc l'occultation est un phénomène aléatoire, la puissance dissipée représente l'inconvénient majeur.

Ce phénomène cause des pertes de puissance lors de deux connexions série en court circuit et parallèle en circuit ouvert. C'est pourquoi nous avons complète le modèle propose dans la thèse par l'introduction de facteur d'occultation au niveau de la tension d'avalanche.

A partir de la simulation réalisée, la caractéristique $I(V)$ et la puissance dissipée de la cellule occultée sont déduites.

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 la SOAR (safe operating area) ou l'introduction des diodes by passe dans les cellules.

Nous avons aimé de 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 d'un module sans et avec occultation.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

[1] : B Bourges ; M Albuisson ; D Mayer ; L Wald « Le gisement solaire dans le cas des applications photovoltaïques ».Le développement du solaire photovoltaïque. Journée, Paris, France. 10/12/1998.

[2] :[http:// www. thermesciel.fr](http://www.thermesciel.fr).

[3] :A. Lauger.J.A.Roger « Les photopiles solaire» technique et documentation ,1981.

[4] : C.Delerome « Revue internationale d'héliotechnique »année 1997.

[5] : A.Ricaud « Photopiles solaire de la physique de conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés ».presses polytechniques et universitaires romandes 1997.

[6] :G.Bonnet « Rapport interne ENS de Lyon » 2002.

[7] : [http://www. Les panneaux solaire PV](http://www.lespanneauxsolairepv.com) regroupement des cellules PV reliées entre elles en série en parallèle.

[8] :M.Orgeret « Les piles solaires », Paris.1985.

[9]: C.H.Cox, III, D.J.Silversmith « Reduction of photovoltaic cell reverse breakdown by a peripheral bypass diode» Massachusetts Institute of Technology Lincoln Laboratory (IEEE 1982).

[10] :L.Kemmouche, M.Marir et B.Marir « Phénomène de Hot Spot dans un Module Photovoltaïque Partiellement Masqué » Rev.Eneg.Ren : ICPWE pages : 15-18,2003.

[11] : M. Angel ; Cid Pastor « Conception et réalisation de modules photovoltaïque électroniques ».thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, année 2006. ECOLE DOCTORALE : GEET
LABORATOIRE : Laboratoire d'Analyse et d'Architectures des Systèmes (LAAS-CNRS)

[12] : [http://www. Production d'énergie électrique](http://www.productiondenergieelectrique.com) : Energie solaire photovoltaïque.

[13]:B.Eqeur,"Energie solaire photovoltaïque"Volume 1,1993.

[14]:J.A.Roger.C.Maguin, «Solar pannel simulation including dynamical thermal effect». Solar energy vol.29 n°3 pp 245-256,1980.

[15]:L.Baxerres, A.Michallet, C.Ramet; « Projet d'initiative personnelle « Le Microtransat » Partie électronique et énergétique .année 2005-2006.

- [16] : L.Kemmouche, « Modèle de fonctionnement d'une station solaire PV en prévision de pannes »Thèse de magistère .Constantine, 2002.
- [17] : Nichiporuk Olesky ; « Simulation, fabrication et analyse de cellules PV à contacts arrières interdigités », thèse de doctorat,Institut national des science appliquées de Lyon année 2005.
- [18] : Benoit Brousse : « Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique » thèse de Doctorat .Université de Limoges année 2004
- [19]: Marir-Benabbas M : « Etude du problème de « HOT SPOT » dans un module solaire photovoltaïque » Thèse de magistère .Constantine. 1984
- [20]: J.L.Watkins.E.L.Burgess: « The effect of the solar cell parameters variation on array power»13th IEEE photovoltaic specialists. 1978.
- [21]: R Hamza, M Khadraoui: « Modèle de détermination de la surface de sécurité lors du problème de "Hot Spot" dans un générateur PV » mémoire d'ingénieur, Constantine.1996.
- [22]:M.Wolf and H.Rauchanbach « Serie resistances effects on solar cells measurements » Advanced energy conversion vol3 pp 455-479.1963.
- [23]:P.L.Jett, J.L.Miller. « Analysis of effects of shadowed and open solar cells on orbital workshop solar cell array performance». .pp:889-900. 1971
- [24]: Stephan ASTIER B. Flèche, D. Delagnes : « Energie solaire photovoltaïque »Toulouse,juin .2007.
- [25]: P.Spirito et V.Albergamo. «Reverse bias power dissipation of shadowed or faulty cells in different array configurations » 4th .E.C.PVSEC, pages: 296-300, Italy (1982).
- [26]J.A.Roger et Laugier : « Les photopiles solaire »1981.
- [27]:J.A.Roger, S.Massed, J.Posbic et J.Pivot: «Disequilibrium's in series connected solar cells » Proceeding 4th photovoltaic conference CEE Stresa 1982.
- [28]:K.D.Rasch et K Roy: «shunt and blocking diodes for protection of space solar array » (IEEE 1981).
- [29]: Blake and K.L Hanson «The hot spot failure mode for solar arrays» Proc 4th IECEC, 575-581. (1969).
- [30]:E.Molenbroek, D.W.Waddington, K.A.Emery «Hot spot susceptibility and testing of PV modules». Volume 91,Pages: 547-552, (IEEE). (1991).

[31]:K.Agroui, «Simulation de l'effet de hot spot dans un module photovoltaïque de technologie monoverre et biverre au silicium cristallin »Alger 2000

[32]: Achim Woyte, J.Nijs, and R.Belmans:«Partial shadowing of photovoltaic arrays different system configurations: literature review and field test results».Volume 74, Issue 3, Pages: 217-233, Mars 2003.

[33]: Jimmy Royer Thomas Djiako Eric Schiller Bocar Sada Sy: «Le pompage photovoltaïque : Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens ». IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA.1998.

[34]: Publication (phtowatt) O.N.A.104.

[35]:T.Fogelman «System photovoltaïque pour les pays en développement manuel d'utilisation et d'installation » Agence française pour la maîtrise de l'énergie

[36]: J.C.Larue and E Trien: «Effect of partial shadowing on solar panels. European space technologie center, the Netherlands and "centre d'etudes spatiales»; Toulouse; France.

[37]:A.Fortin, « Analyse numérique pour ingénieurs» Edition l'école polytechnique de Montréal, 1995.

[38] :M.S.Swleh .M.A.Green: «effect of shunt and bypass diode on the shadow » Solar cells, 5 (1982) 183-198.

[39]: Martin A..Green, «solar cells operating principal's technologie and system applications». (1982).

[40] : M.Benabbas -Marir, BE .Marir, R-Mertens: «Etude du problème de points chauds dans un module solaire PV» The eighth conf, ou solide state Menia University Fev 1985.

[41]: M.Benabbas -Marir, BE .Marir, «Breakdown phenomena in shadowed solar cells».IEEE/ICECS95 J dec 1995.

[42]: M.Benabbas -Marir, BE .Marir «Circuit design modelisation for PV modules and systems » The 7th .Int.Energy conf and Exhibition ENERGY 98 Manama, Bahrein, Nov 1998.

[43]:Raghuramau P: «Operating temperature of PV modules». M.I.T.Report n° C00-4094-59.

[44]:J.C.Arnett.,C.C.Gonzales: «Photovoltaic module hot spot durability design and test methods».15th IEEE photovoltaic specialists conferences (1981).

[45]:J0A.Roger .C Maguin. «Etude de groupements de modules photovoltaïque compte rendue d'étude d'une recherche financée par la délégation générale de la recherche scientifique et technique».Dec1980.

[46]: “Recueil de classification”:61215:1993, Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules-design qualification and type approval.

[47]: “Recueil de classification”:61646:1996, Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules-design qualification and type approval.

[48]: M.C.Alonso-Garcia, J.M.Ruiz «Analysis and modelling the reverse characteristic of photovoltaic cells» .Volume 90, Issue 7-8, Pages: 1105-1120, 5 Mai 2006.

[49]:Keddeche.M.Gheraibia R. «Contribution a l'étude d'une station d'éclairage photovoltaïque» mémoire d'ingénieur.