REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITEYAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energie Renouvelable En Mécanique

Modélisation et Simulation Numérique d'une cellule solaire

Présenté par

Mr.BeyBoumezrag Lyes

Mr.Tayeb Karim

Proposé et Dirigé par

Dr. Chiba Younes

Promotion 2019

Remerciements

Nous remercions ALLAH le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la santé et la patience de mener à terme ce présent travail.

Nous tiens spécialement à remercier Dr. Chiba Younes d'avoir accepté nos encadrements, de son intérêt constant qui nous avons guidé dans notre travail, et de ses conseils au cours de notre travail.

Nous adressons nos vives reconnaissances à tous les enseignants et le personnel du département de Génie-Mécanique et spécialement les enseignants de la spécialité.

Enfin, nous remerciements les membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

L'âme de mon père qui été mon corps mieux qu'un cœur.

Ma chère mère qui à sacrifié son temps pour nous.

Mes frères et mes sœurs et toute ma famille.

Ma femme et mes filles Tesnime, IsraaNourhane

Mon binôme Karim

Tous mes amis.

Tous mes collègues.

Tous ceux qui m'ont aidé pour accomplir ce mémoire.

Tous les professeurs qui nous ont enseigné car si nous sommes là

aujourd'hui c'est bien grâce à vous tous, donc un grand merci pour vous

-B. Lyes - .

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ma chère mère qui à sacrifié son temps pour nous.

De mon père Rabi yrhmou

Mon frère et ma sœur.

Ma femme

Mon binôme Ilyass

Tous mes amis.et mes collègues.

Tous ceux qui m'ont aidé pour accomplir ce mémoire.

Tous les professeurs qui nous ont enseigné car si nous sommes là

aujourd'hui c'est bien grâce à vous tous, donc un grand merci pour vous

-T.Karim-

Résumé

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie est convertie en production d'électricité par des cellules solaires. Ce travail présente une simulation numériqued'une cellule photovoltaïque selon la structure proposée pour estimer les paramètres et les caractéristiques de la cellule, Un modèle numérique a été développépour prédire la performance de la cellule PV, en se basant sur les grandeurs de tension-courant et de tension-puissance, les résultats obtenus à travers le modèle numérique sont analysés et discutés.Nous avons vu par le concept de la simulation l'influence de différents paramètres sur la caractéristique I-V de la cellule etNous avons vu ensuite l'effet des changements climatiques sur les Caractéristiques (I(V) et P(V)) de la cellule PV, puisque le courant changer avec le changement de l'éclairement, et la tension changer avec le changement de la température,

Mots clés : cellule solaire, PV, Simulation numérique, qualitéd'énergie.

Abstract

Solarenergyis a source of energythatdepends on the sun. This energyisconvertedintoelectricity production by solarcells. This workpresents a numerical simulation of a photovoltaiccellaccording to the proposed structure to estimate the parameters and characteristics of the cell. A numerical model has been developed to predict the performance of the PV cell, based on the voltage-current variables. and of voltage-power, the resultsobtainedthrough the numerical model are analyzed and discussed.We have seen by the concept of the simulation the influence of differentparameters on the characteristic IV of the cell and we have seenthen the effect of the climatic changes on the characteristics (I (V) and P (V)) of the cell PV.since the current changes with the change of illumination, and the voltage change with the change of temperature,

Key words:solarcell, PV, numerical simulation, energyquality.

ملخص:

الطاقةالشمسيةهيمصدر للطاقةيعتمد علىالشمس. يتمتحويلهذهالطاقةإلىإنتاجالكهرباء عنطريقالخلاياالشمسية.

يقدمهذاالعملمحاكاة عدديةللخلاياالكهروضوئيةوفقًاللهيكلالمقترحلتقدير معالموخصائصالخلية،وقدتمتطوير نموذجرقميللتنبؤبأداء الخل يةالكهروضوئية،استنادًاإلىقياساتالجهد. الحاليةوالجهدالسلطة،ويتمتحليلالنتائجالتيتمالحصولعليهامنخلالالنموذجالعدديو مناقشتها.

لقدرأينامنخلالمفهومالمحاكاةتأثير المعلماتالمختلفةعلىالخاصيةالرابعةللخليةورأينابعدذلكتأثير التغير اتالمناخية علىخصائصلأنالتياريت PV. للخلية (P (V) و I (V)) غيرمعتغير الإضاءة،والجهديتغيرمعتغير درجةالحرارة

الكلماتالمفتاحية: الخلاياالشمسية،الكهروضوئية،المحاكاةالعددية،جودةالطاقة.

SOMMAIRE

Sommaire

Remerciement
Dédicace
Liste des figures
Liste des tableaux
Liste des symboles

Introduction Générale……. 02

Chapitre I:Notions essentielles sur le gisement solaire

I.1 Introduction…….. 05
I.2 Gisement solaire……..…….. 05
I.2.1 Le spectre solaire……..…… 05
I.2.2 Gisement solaire au sol ……... 08
I.2.3 Le rayonnement solaire……...…….. 10
I.2.4 Dualité de la lumière…..…..……. 12
I.3 Coordonnées terrestres……...…….. 13
I.3.1 Longitude……..……. 13
I.3.2 La latitude…..…… 13
I.3.3 L'altitude…….. 14
I.4 Le mouvement de la terre et le mouvement du soleil et ses coordonnées ……..…… 14
I.4.1 Mouvement de rotation… ……..……... 14
I.4.2 Mouvement de translation …….……..... 15
I.4.3 La variation annuelle du rayonnement direct ……..…….. 15
I.5 Les coordonnées du soleil……... 15
I.5.1 Coordonnées équatoriales ……..…… 16
I.5.1.a Déclinaison solaire (δ)……...……. 16
I.5.1.b Angle horaire du soleil (H) …… 17
I.5.2 Coordonnées horizontales …….. 18
I.5.1.a La hauteur du soleil (h) ……...……. 18
I.5.1.b Azimut du soleil (a)……...……. 18

I.6 Différents types de rayonnement ……..……..……..……... 18
I.6.1 Rayonnement direct…..……..……... 19
I.6.2 Rayonnement diffus…..……..……... 20
I.6.3 Rayonnement réfléchi…...……..……... 20
I.6.4 Rayonnement globale…...……..……... 20
I.7 Conclusion…...……..……...……... 21

Chapitre II: Généralité sur les systèmes photovoltaïques

II.1 Introduction…….....23
II.2 Note historique……...…….....23
II.3 Semi-conducteur…….....24
II.3.1.Le Dopage…..……...24
II.3.1.1 Type N…..……..24
II.3.1.2 Type P…….……25
II.3.2.Jonction P-N…….……25
II.4 Photovoltaïque…….....25
II.4.1 Effet photovoltaïque…….……..…….....25
II.4.2 Cellule photovoltaïque (PV)… ……..…….....26
II.4.2.1 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque……..….....26
II.4.2.2 Les types des cellules photovoltaïques……...…….…….....26
a-Cellules cristallines……..26
b-Cellules à base de couches minces……...…….....28
c-Cellules à haut rendement…...…….....28
d-Cellules organique……...……31
e-Cellules solaires sensibilisées par colorant (CSSC)……...…….32
II.4.2.3 Architecture d'une cellule photovoltaïque…….....33
a-Texturisation de la surface……..…….…….....33
b-Les contacts face avant et face arrière…….…….……...33
c-La couche antireflet……...……..34
d-La passivation……...…….....34
e-Champ électrique dans la zone arrière (BSF)…….....34
II.4.3 Association des modules photovoltaïques…..…….....34
II.4.3.1 Montage en série……..……...34

II.4.3.2 Montage en parallèle..…..……..35
II.4.3.3 Montage mixte……..…….....36
II.4.4.Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques……..……...…….36
II.4.4.1 Les avantages……..……...……..36
II.4.4.2 Les inconvénients…….……...……...……..36
II.5 Conclusion……..…….....37

Chapitre III: Modélisation d'une cellule photovoltaïque

III.1 Introduction……..39
III.2 Les paramètres électriques……...…….…….....39
III.2.1 Le courant de court-circuit (Icc)……...…….…….....39
III.2.2 La tension de circuit ouvert (Vco). …….……..……40
III.2.3 La puissance (P)……...…….…….....41
III.2.4 Facteur de forme (FF)…….....41
III.2.5 Le rendement (η)…….....41
III.2.6 La résistance série (Rs)…….....41
III.2.7 La résistance shunt (Rsh)……..……...…….....42
III.2.8 Facteur d'idéalité (n)……...……...42
III.3 Modélisation d'une cellule photovoltaïque……...42
III.3.1 Modèles à une diode…...…..……...……...43
III.3.2 Modèles à deux diodes……..…….……...…….46
III.4 Conclusion…….……48

Chapitre IV: Simulation et discussion des résultats

IV.1 Introduction……...……...…….....50
IV.2 Simulation et discussion des résultats …..…….50
IV.2.1 Caractéristique I-V…….……...…….....50
IV.2.2 Influence de la température sur la caractéristique I-V…..…….51
IV.2.3 Influence de la résistance série….…….……52
IV.2.4 Influence de la résistance parallèle (shunt)..…….…..……..53
IV.2.5 Influence du facteur d'idéalité…….…….…….54
IV.2.6 Influence du rayonnement solaire……..……55

IV.3 Conclusion……..……..……57

Conclusion Générale……...…….....59

Annexe.

Bibliographique.

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I:Notions essentielles sur le gisement solaire

Figure I.1 : Eclairement solaire **06**

Figure I.2 : Schéma indiquant le nombre d'air masseAM_xen fonction de la position **07**

Figure I.3 : Irradiation globale (W/m²) au sol à Toulouse du 11 juin au 14 juin 2009 **08**

Figure I.4 : Disque Solaire pour la ville de Lyon **09**

Figure I.5: Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal au mois du juillet **10**

Figure I.6: Rayonnement solaire transmis à la terre **11**

Figure I.7: Coordonnés terrestre **13**

Figure I.8: Courbes d'ensoleillement typique par mois pour différentes latitudes **14**

Figure I.9: mouvement de la terre autour de soleil **15**

Figure I.10: Variation annuelle de la déclinaison du soleil **16**

Figure I.11: variation de l'angle horaire en fonction de temps solaire vrai **17**

Figure I.12: Repère horizontal **18**

Figure I.13: Différents *composants de rayonnement* **19**

Chapitre II: Généralité sur les systèmes photovoltaïques

Figure II.1 : Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque **26**

Figure II.2 : Photo d'un substrat de silicium polycristallin (échelle : 10×10 cm2) **27**

Figure II.3 : Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin **27**

Figure II.4 : Schéma d'une structure tandem **29**

Figure II.5 : Principe de la cellule à hétérojonction **30**

Figure II.6 : Schéma de principe d'un concentrateur photovoltaïque **31**

Figure II.7 : Schéma du principe de fonctionnement d'une CSSC **32**

Figure II.8 : a) Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant sur une surface texturée ;b) Plaque desilicium après texturation **33**

Figure II.9 : Caractéristique d'un groupement de modules PV en série **35**

Figure II.10 : Caractéristique d'un groupement de modules PV en parallèle **35**

Figure II.11 : Caractéristique d'un groupement mixte de modules PV **36**

Chapitre III: Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Figure III.1 : Les caractéristiques Courant- tension et Puissance-tension **39**

Figure III.2 : schéma du circuit électrique d'une cellule PV avec une diode **43**

Figure III.2 : schéma du circuit électrique d'une cellule PV avec une diode **46**

Chapitre IV: Simulation et discussion des résultats

Figure IV.1 : Caractéristique I-V d'une cellule solaire **50**

Figure IV.2 : Influence de la température sur la caractéristique I-V **51**

Figure IV.3 : Influence de la résistance série sur la caractéristique I-V **52**

Figure IV.4 : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique I-V **53**

Figure IV.5 : Influence du facteur d'idéalité sur la caractéristique I-V. **54**

Figure IV.6 : La caractéristique I=f(v) et P=f(V) en fonction de l'éclairement **55**

Figure IV.7: La caractéristique η=f(V) en fonction de l'éclairement **56**

Figure IV.8 : La caractéristique FF=f(V) en fonction de l'éclairement **56**

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I:Notions essentielles sur le gisement solaire

Tableau I.1: Disque solaire en Algérie **09**

Tableau I.2: Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire **12**

Chapitre II : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

Tableau II.1 : Evénements notables dans l'histoire du photovoltaïques. **23**

Chapitre III: Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Tableau III.1 : indique les conditions de test standard de la cellule.**44**

Liste des symboles

Monoculture

Symbole	Description	Unité
d_1	Diode 1	
d_2	Diode 2	
E	Eclairement ou flux incident	W/m^2
FF	Facteur de forme	%
I	Courant fournit par la cellule photovoltaïque	A
I_{cc}	Courant de court-circuit	A
I_d	Courant inverse de diode	A
I_{d1}	Courant inverse de diode 1	A
I_{d2}	Courant inverse de diode 2	A
I_{max}	Courant maximal	A
I_{ph}	Photo-courant	A
I_{sh}	Courant qui circule dans la résistance shunt	A
I_s	Courant inverse de saturation ou de fuite de la diode	A
I_{s1}	Courant inverse de saturation ou de fuite de la diode 1	A
I_{s2}	Courant inverse de saturation ou de fuite de la diode 2	A
K	Constante de Boltzmann	J/K
♦	Facteur d'idéalité de la diode	
n_1	Facteur d'idéalité de la diode 1	
n_2	Facteur d'idéalité de la diode 2	
P	Puissance fournit par la cellule	W
P_{inc}	Puissance lumineuse incidente	W
P_m	Puissance maximale	W
PV	Photovoltaïque	
Q	Charge de l'électron	C
R_{ch}	Résistance de charge variable	Ω
R_s	Résistance série	Ω
R_{sh}	Résistance shunt (parallèle)	Ω
S	Surface de la cellule photovoltaïque	m^2
T	Température absolue	K
V	Tension aux bornes de la cellule	V
V_{co}	Tension de circuit ouvert	V
V_{max}	Tension maximale	V
η	Rendement	%

Introduction Générale

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir effet, les besoins énergétique des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement, un grande partie de la production mondiale d'énergie est assuré à partir de source fossile.

La consommation mondiale d'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications.

De nos jours, une grande partie de la production électrique est produite à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. Ce qui entrainera à plus ou moins courte échéance un risque non nul d'épuisement de ces ressources. D'autant plus que la demande ne cesse de croître et dès à présent à être supérieure à l'offre, se traduisant par exemple par une forte fluctuation du prix mondial du pétrole.

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables: l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque, Aujourd'hui, les énergies renouvelables deviennent progressivement des énergies à part entière, rivalisant avec des énergies fossiles du point de vue coût et performance de production.

Cependant, leur système de conversion de l'énergie en électricité souffre souvent d'un manque d'optimisation qui en fait encore des systèmes trop chers, et présentant des déficiences importantes en rendement et en fiabilité. Pour cela, bien qu'il existe de plus en plus de travaux de recherches prouvant la viabilité de sources comme, par exemple, l'énergie photovoltaïque (PV) ou l'énergie éolienne, beaucoup de réticentes existent encore pour installer ces systèmes à grande échelle, autant en production de masse que chez des particuliers.

Bien que l'énergie photovoltaïque soit connue depuis de nombreuses années comme source pouvant produire de l'énergie électrique allant de quelques milliwatts au mégawatt, ilestsolution attrayante commeremplacementou complément dessourcesconventionnelles d'approvisionnement en électricité en raison de ses nombreux avantages :

• La production de cette électricité renouvelable n'émet pas de gaz à effet de serre, il faut cependant réduire l'impact environnemental de la fabrication du système

• La lumière du soleil étant disponible partout et quasi-inépuisable, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne, dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville, et aussi bien au sud que dans le nord.

• L’électricité photovoltaïque peut être produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur, ce qui la rend accessible à une grande partie de la population mondiale [50].

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur la modélisation d’une cellule photovoltaïque, étude des défirent paramètres sur les caractéristiques I(V) et P(V)d’une cellule .Pour se faire nous avons présenté ce manuscrit de la façon suivante :

• Dans le premier chapitre, nous décrivons les notions essentielles sur le gisement solaire à savoir les coordonnées terrestres et horaires, les temps de base, le mouvement de la terre autour du soleil et les différents types de rayonnements.

• Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté une généralité sur les systèmes photovoltaïques et l’effet photovoltaïque, la construction des cellules photovoltaïques et leurs principe de fonctionnement .les avantages et inconvénients.

• Dans le troisième chapitre, on étudie une modélisation de chaque élément du système photovoltaïque réalisé.

• Dans le dernier chapitre, nous avons discuté les résultats de la simulation de différents paramètres sur la caractéristique I-V de la cellule.

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Notions essentielles sur le gisement

I-1 Introduction :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 15000 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowattcrête par mètre carré (kWc/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que ne consomme l'humanité en une année [1].

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, l'étoile la plus proche de la terre. La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et, malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité encore importante arrive à la surface du sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m^2dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau. Le flux solaire reçu au niveau du sol terrestre dépend ainsi de plusieurs paramètres comme :

- l'orientation, la nature et l'inclinaison de la sur face terrestre,
- la latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que de son altitude,
- la période de l'année,
- l'instant considéré dans la journée,
- la nature des couches nuageuses.

Les zones les plus favorables sont répertoriées sou forme d'atlas et mettent en évidence des « gisements solaires » à la surface de la terre [2].

I-2 Gisement solaire :

Comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire à l'étude des systèmes photovoltaïques. 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 spectre du rayonnement solaire.

I-2-1 Le spectre solaire :

Le spectre du rayonnement électromagnétique solaire comporte une très grande étendue, depuis les rayonnements radio jusqu'aux rayons X. On distingue en général le spectre continu,

qui est sensiblement celui d'un corps noir à environ 6000°K et le spectre réel d'émission du soleil [4].

La figure I-1 présente la courbe d'énergie du corps noir à6000K, le rayonnement solaire horsde l'atmosphère et le rayonnement solaire au niveau de la mer en fonction de la longueur d'onde. Ces courbes montrent que 9,2% de l'énergie de ce spectre se trouve dans l'ultraviolet, 42,4% dans le visible et 48,4% dans l'infrarouge.

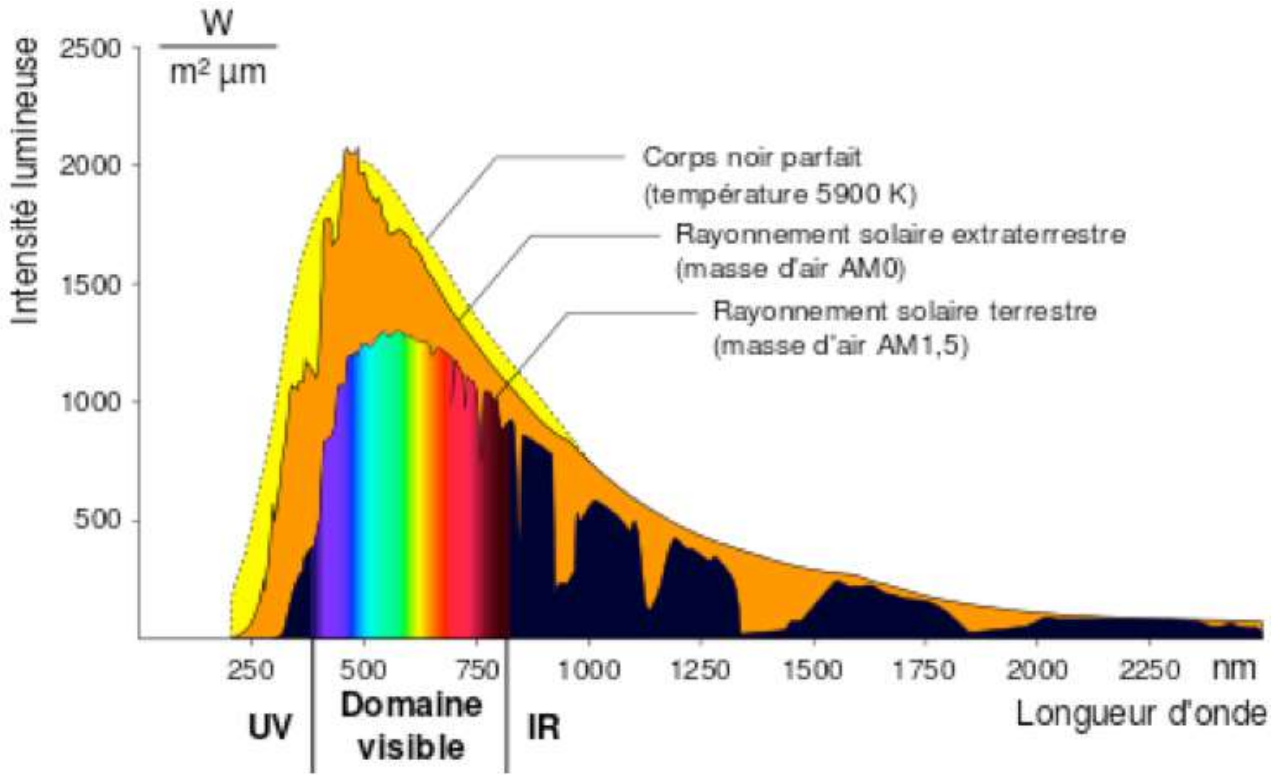


Figure I-1 : Eclairement solaire [1]

D'après la figure I-1, nous constatons que le rayonnement solaire peut être réfléchi, diffusé ou absorbé. Par ailleurs, les spectres des rayonnements réfléchi, diffusé, et absorbé sont différents.

A la surface de la terre, le spectre solaire n'est pas le même que dans l'espace, car il est pondéré par l'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère (O_3, CO_3, H_2O,……). Lesconditions climatiques ainsi que la présence de particules influencent également la valeur réelle du spectre. Pour tenir compte de ces différences, comparer les performances des cellules solaires et qualifier les différents spectres solaires utilisés, on introduit un coefficient appelé masse d'air (AMx) dont l'expression est:

$$x = \frac{1}{\sin\theta} \quad \text{(I.1)}$$

Où : θ est l'angle que fait le soleil avec son zénith. Par définition, AM0 correspond aux conditions hors atmosphère. Quand le soleil fait un angle de 48.19° par rapport au zénith, la lumière incidente est dite AM1.5. Le nombre de masse d'air caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire (83.3 mW/cm² pour AM1.5 dont la surface est inclinéeà37° du soleil) et de plus, sert de standard pour quantifier les performances de nouveaux dispositifs photovoltaïques. Les conditions standards de caractérisation sont définis par les normes IEC-60904 de l'International Electrotechnique Commission (IEC) selon une distribution spectrale AM1.5 global (somme des rayonnements directs et diffus), d'intensité 100mW/cm² et pour une température de cellule de 25°C [3,9].

Au sol, le rayonnement solaire a au moins deux composantes : une composante directe et une composant diffuse (rayonnement incident diffuséou réfléchi par un obstacle : nuages, sol) formant le rayonnement global. La Figure I-2 montre le spectre d'émission solaire sous AM1.5 global normalisé à 100 mW/cm² [5,6].

Sa valeur dépend de la pression, de l'altitude et de l'angle d'incidence des rayons lumineux. L'intégration de l'irradiante sur la totalité du spectre permet d'obtenir la puissance P (en $W.m^{-2}$) fournie par le rayonnement. Pour simplifier on utilise les notions suivantes [5]:

AM0: Hors atmosphère (application spatiale). P 1.36$KW.m^{-2}$

AM1: Le soleil est au zénith du lieu d'observation (à l'équateur).

AM1.5G : Spectre standard, le soleil est à 45°.P 1$KW.m^{-2}$

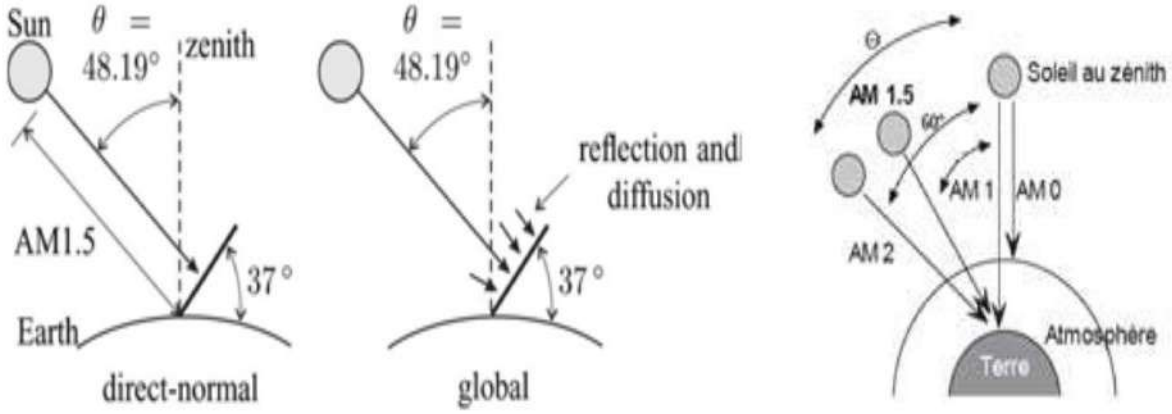


Figure I-2: Schéma indiquant le nombre d'air masse AM_x en fonction de la position géographique

I-2-3 Gisement solaire au sol :

Le gisement solaire au sol est très variable comme présenté sur la figure I-3. La mesure aété faite à l'université Paul Sabatier à Toulouse [7].

Nous constatons une variabilité importante les jours nuageux (1) par rapport aux jours avec éclaircies (2) et les jours de soleil (3). L'irradiation du soleil les jours nuageux est environ 200W/m² alors qu'elle est de 1000W/m² pour les jours ensoleillés. La présence de nuages modifie sensiblement l'importance des rayonnements du soleil, les nuages jouant un rôle de milieu diffusant [7].

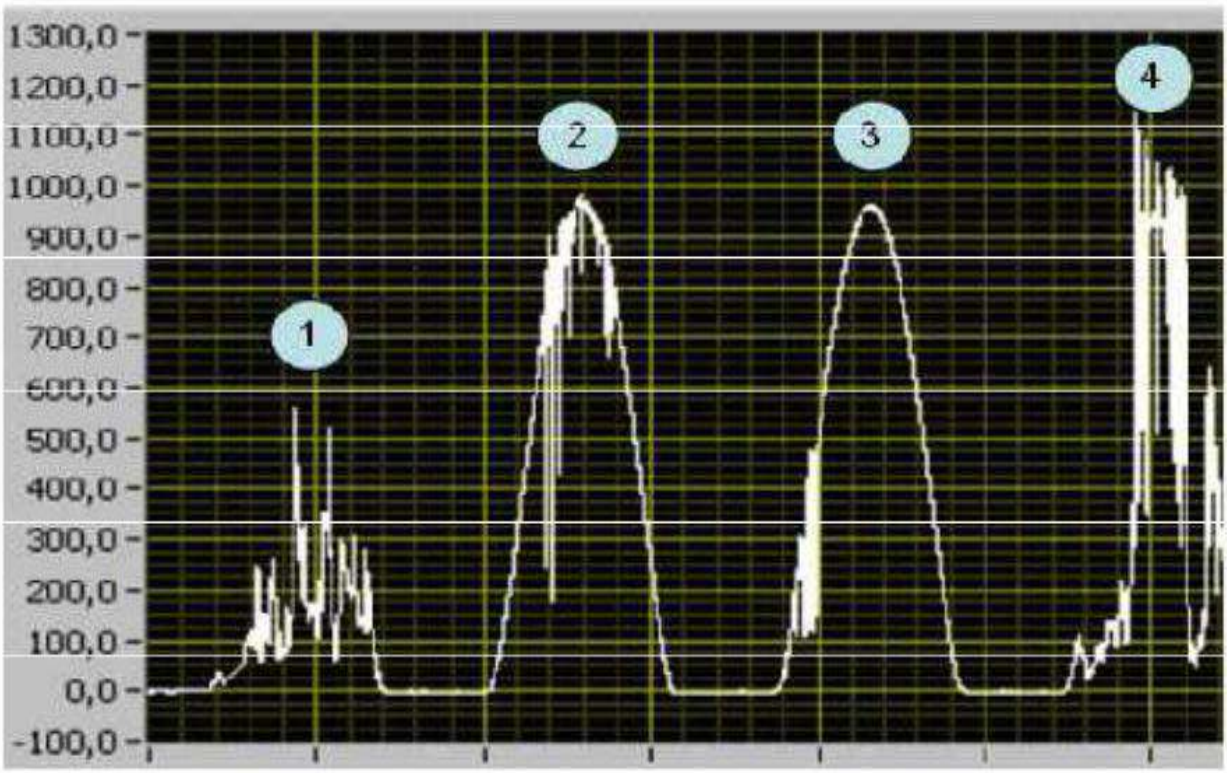


Figure I-3 : Irradiation globale (W/m²) au sol à Toulouse du 11 juin au 14 juin 2009 (date proche du solstice d'été) [7]

Par ailleurs, l'orientation et l'inclinaison sont essentielles. D'après l'exemple de la figure I-4, l'idéal est une orientation plein sud. Néanmoins on voit que avec une orientation Est et une pente de 20° le rendement est d'environ 87% (donc 13% de pertes par rapport au plein sud).

Sur le disque solaire de la figure I-4, on constate que dans toutes les orientations et inclinaisons, les pertes par rapport à un positionnement optimal restent inférieures à 50%, ce qui montre que l'on peut généralement utiliser l'énergie solaire quelle que soit le positionnement [7].

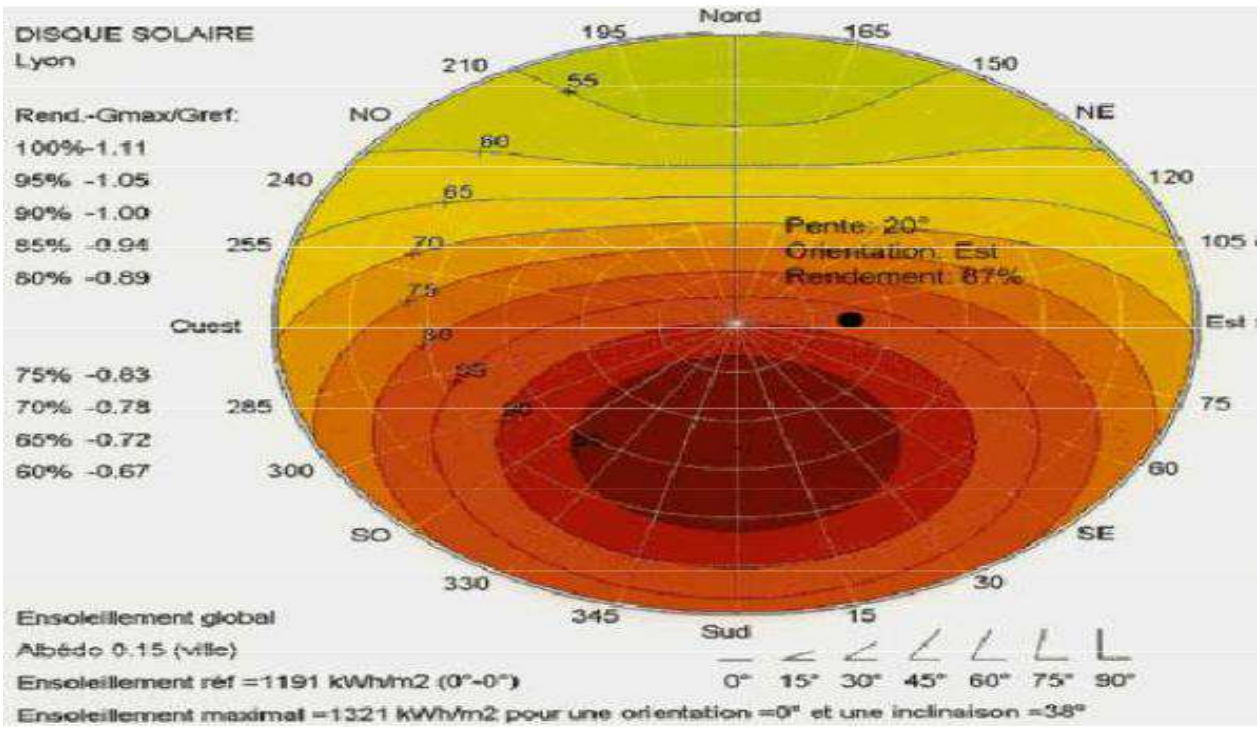


Figure I-4 : Disque Solaire pour la ville de Lyon [7]

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisementssolaires les plus importants du monde. La duréed'insolationsur la quasi-totalité du territoirenational (tableau I.1) dépasse les 2000 heuresannuellement et atteint les 3500 heures (au Sahara). L'énergie recue quotidiennementsurune surface horizontale de 1 m^2est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soitprès de 1700 kWh/m^2/an au Nord et 2650 KWh/m^2/an au sud du pays.

Régions	Régioncôtière	Hautsplateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Duréemoyenned'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energiemoyennereçue (kWh/m^2/an)	1700	1900	2650

Tab.I.1 Disque solaire en Algérie [49]

Example surIrradiation globalejournalière recue sur plan horizontal au mois du juillet figure I.5.

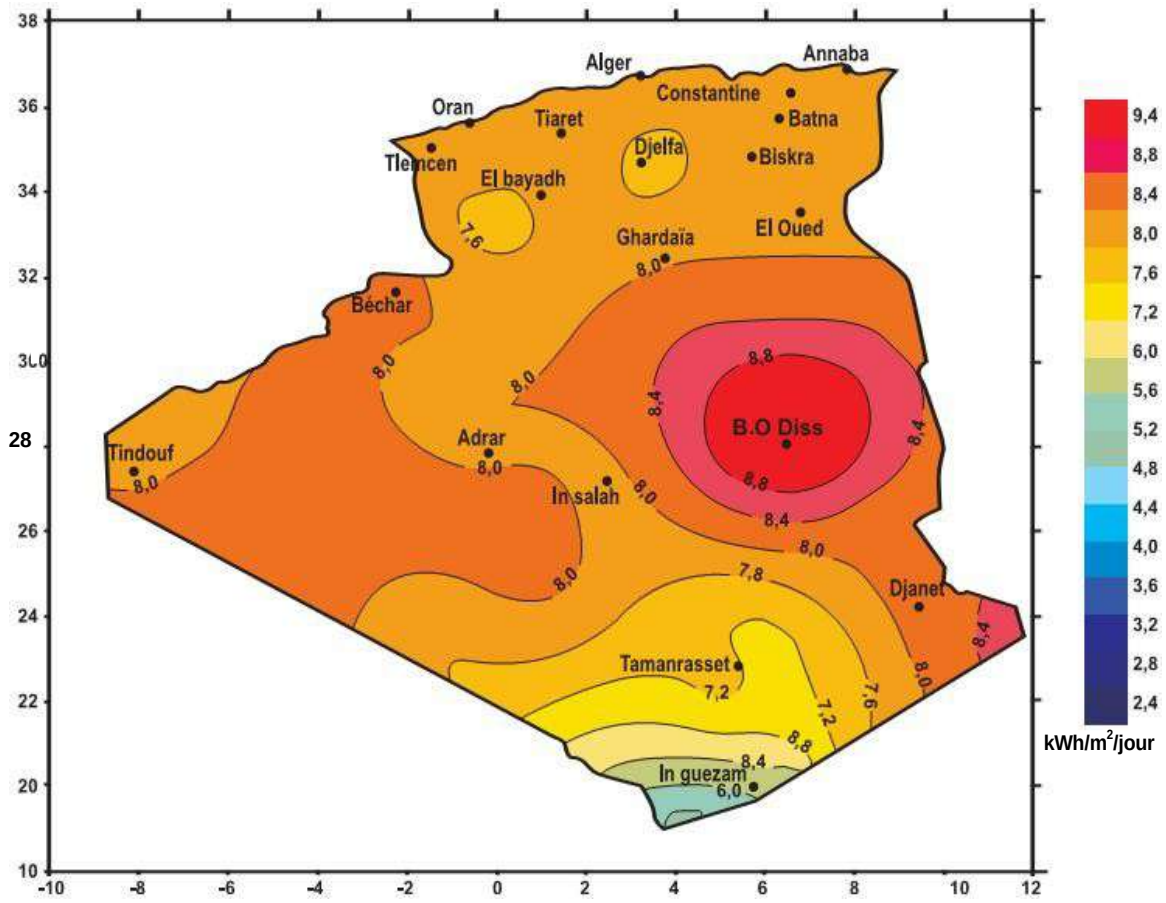


Figure I.5 : Irradiation globalejournalière recue sur plan horizontal au mois du juillet[49]

I-2-4 Le rayonnement solaire :

Le rayonnement émis par le soleil est constitué d'ondes électromagnétiques dont une partie parvient constamment à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la température superficielle du soleil (environ 5800 K), ce rayonnement électromagnétique se situe dans la gamme de longueur d'onde de la lumière visible (entre 0,4 et 0,75 µm) et dans le proche infrarouge (au-delà de 0,75 et jusqu'à 4 µm environ). L'énergie véhiculée par ce rayonnement, moyennée sur une année et sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un éclairement de 340 $Wm.^{-2}$ (Fig. I-6). Un bilan énergétique montre que, sur cette quantité d'éclairement qu'apporte le soleil au système terre+atmosphère, environ 100 $W.m^{-2}$ sont réfléchis vers l'espace ; seul le reste est absorbé, a pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la sursurface de la terre [3,8].

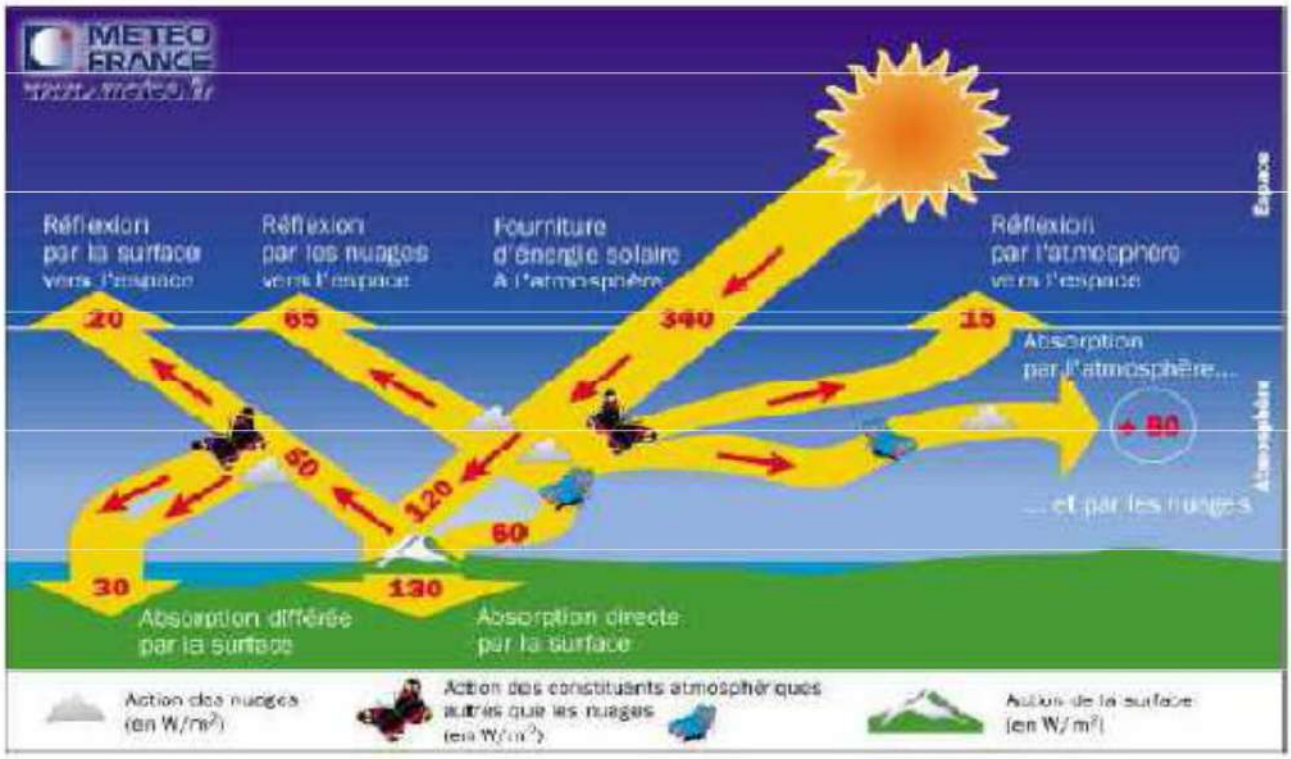


Figure I-6 : Rayonnement solaire transmis à la terre

La figure I-6, publiée par Météo France, montre que près du quart de cet éclairement incident est réfléchi dans l'espace par l'atmosphère : pareille réflexion est essentiellement le fait des nuages (65 $W.m^{-2}$), le reste (15 $W.m^{-2}$) étant dû aux autres constituants atmosphériques comme les gaz et aérosols. Il reste donc 180 $W.m^{-2}$ qui parviennent à la surface terrestre au terme d'une transmission dont les deux tiers (120 $W.m^{-2}$) se font directement, le reste (60 $W.m^{-2}$) s'effectuant par diffusion vers le bas.

Intervient alors un processus complexe d'interaction entre la diffusion vers le bas et laréflexion. Sur les 180 $W.m^{-2}$ incidents, la surface terrestre, qui possède un albédo moyen élevé, devrait renvoyer dans l'atmosphère environ 05$W.m^{-2}$. En fait, la majeure partie de l'éclairement qu'elle réfléchit ainsi lui revient tôt out tard et s'ajoute partiellement aux 180-50 = 130 $W.m^{-2}$ de rayonnement solaire non réfléchis à son contact. Bien que l'absorption du rayonnement solaire soit un phénomène continu, on peut simplifier la compréhension du processus précédent en supposant que les 50 $W.m^{-2}$ réfléchis par la surface du globe se répartissent entre 20 $W.m^{-2}$ définitivement renvoyés vers l'espace interplanétaire et 30 $W.m^{-2}$ qui reviennent à la surface terrestre après diffusion différée vers lebas. Cette énergie s'ajoute aux 130 $W.m^{-2}$ initialement non réfléchis pour constituer approximativement les 160 $W.m^{-2}$ qu'absorbe la surface terrestre [3].

I-2-4 Dualité de la lumière :

La lumière peut être considérée sous forme d'ondes électromagnétiques de longueur d'onde λ ou sous forme de photons, corpuscules possédant une énergie E liée à λ par la relation suivante [5].

$$E = h.\nu = \frac{h.c}{\lambda} \quad (I.2)$$

Avec : h : constante de Planck ($j.s^{-1}$)

c : vitesse de la lumière dans le vide ($m.s^{-1}$)

ν: Fréquence (s^{-1})

λ: Longueur d'onde (m)

La notion de dualité onde/corpuscule est importante pour comprendre les phénomènes d'interaction entre un rayonnement et un matériau.

Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre 0,2μm (*ultra-violet*) et 4μm (*infrarouge*) avec un maximum d'énergie pour 0,5μm. 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre 0,2μm et 2,5μm. De 0,4μm à 0,78 μm, le spectre correspond au domaine du visible. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons.

Le tableau I-2 donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverseslongueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux [18].

λ (μm)	**E (ev)**	**Zone**
0,2	6.2	Ultra-violet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune-vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

Tableau I-2: Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire

Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de capteur, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons. Puis, l'énergie des photons excite des électrons, qui sont ensuite collectés afin de constituer un courant électrique global.

I-3 Coordonnées terrestres :

La Terre est pratiquement une sphère qui tourne autour d'un axe passant par le pole Nord et le pole Sud.

Tout point sur la terre est caractérisé par sa la**t**itude et sa longitude. Ces deux grandeurs représentent les coordonnées géographiques de ce point ainsi que par son altitude, figure I-7

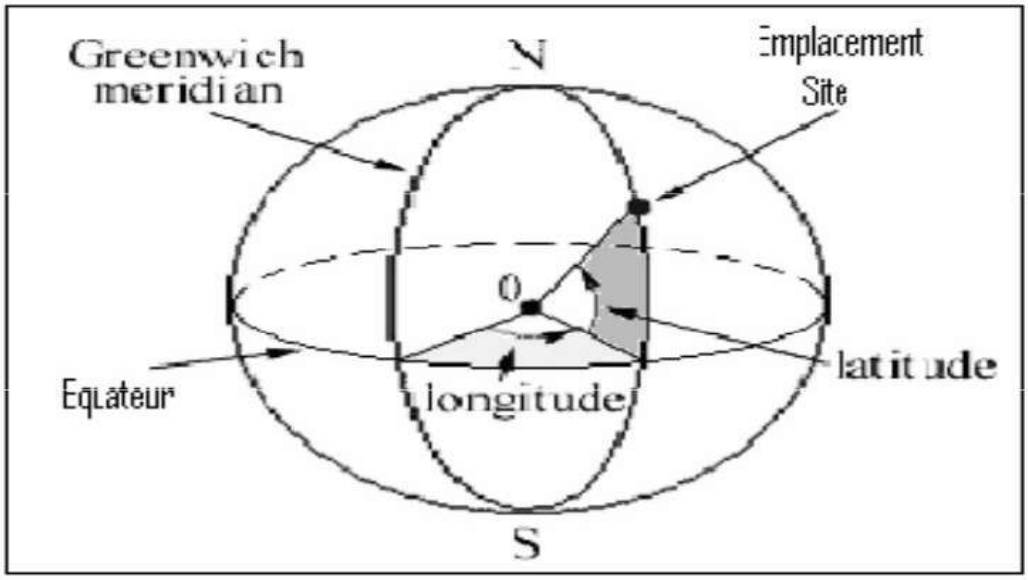


Figure I-7 : Coordonnés terrestre

I-3-1 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.

On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest.

La longitude d'un lieu peut aussi être comprise entre -180° et +180°, à tout écart de 1° de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps. La longitude sera désignée ici par la lettre λ_0 [10].

Longitude OUEST $\lambda_0<0°$

Longitude EST$\lambda_0> 0°$

I-3-2 La latitude :

La latitude d'un lieu à la surface de la terre est l'angle entre l'équateur et le rayon de la terre passant par le lieu considéré. La latitude$\boldsymbol{\varphi}$ est comptée de 0° à +90° dans l'hémisphère nord [11].

La latitude a aussi un effet important : les journées estivales s'allongent à mesurequ'on s'éloigne de l'équateur, et le soleil est plus bas au midi solaire.

Les journées d'hiver sont plus courtes, et le soleil encore plus bas qu'à l'équateur. Autrement dit, l'intensité maximale (à midi) et la quantité totale de rayonnement solaire (G) sur un plan horizontal diminuent à mesure qu'augmente la latitude, Figure I-8 [12].

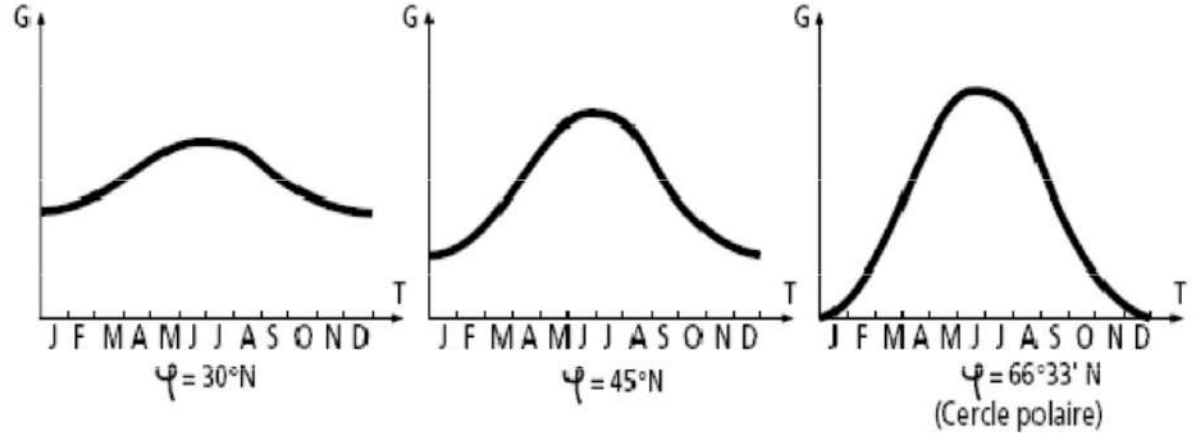


Figure I-8: Courbes d'ensoleillement typique par mois pour différentes latitudes

I-3-3 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 exprime généralement en mètre.

I-4 Le mouvement de la terre et le mouvement du soleil et ses coordonnées :

La trajectoire de la terre autour du soleil s'appelle « l'écliptique ». La distance terre soleil ne varie que ±1.7% par rapport à sa valeur moyenne qui est de $1.49675*10^{8}$km. Cette distance est minimale au début de janvier et maximale au début de juillet [14].

On peut décomposer le mouvement de chacun d'eux en mouvement de rotation et mouvement de translation.

I-4-1 Mouvement de rotation :

La terre tourne autour de son axe de rotation (Pôle Nord, Pôle Sud) dans le sens trigonométrique. L'alternance des jours et des nuits est une manifestation immédiate de ce mouvement.

On définit le jour solaire comme de la durée moyenne entre deux passages consécutifs au méridien d'un lieu, ce jour est divisé en*24* intervalles égaux appelés heurs. La rotation de la terre s'effectue avec une période de *Pr = 23h 56mn 04s »24h*.

Sa vitesse linéaire de rotation à l'équateur est $Vr \approx 0{,}465Km/s$, elle est variable en fonction de latitude φ telle que : $Vr(\varphi) = Vr(Cos(\varphi))$.

Les saisons n'existeraient pas si la terre se tenait droite, sur son orbite. Mais le fait que son axe de rotation est penché d'un angle de $23\,°27 \approx 23.45^{\circ}$avec un mouvement de révolution,

Le pôle Nord et le pôle Sud vont pouvoir successivement se dorer à la lumière.

I-4-2 Mouvement de translation :

Dans l'univers tout est en mouvement. La terre est en rotation sur elle-même puis elle tourne au tour du soleil en Pt = 365jours 5h 48mn 40s $\approx$365.25 jours. Elle décrit une orbite elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Cette orbite est située dans un plan appelé plan de l'écliptique où le soleil est presque au centre. Elle est légèrement aplatie, elle correspond à un cercle de rayon moyen de *1.49675*10^{8}km (1 AU)*. Cette distance est minimale au début janvier et maximale au début de juillet, figure (I-9) [15].

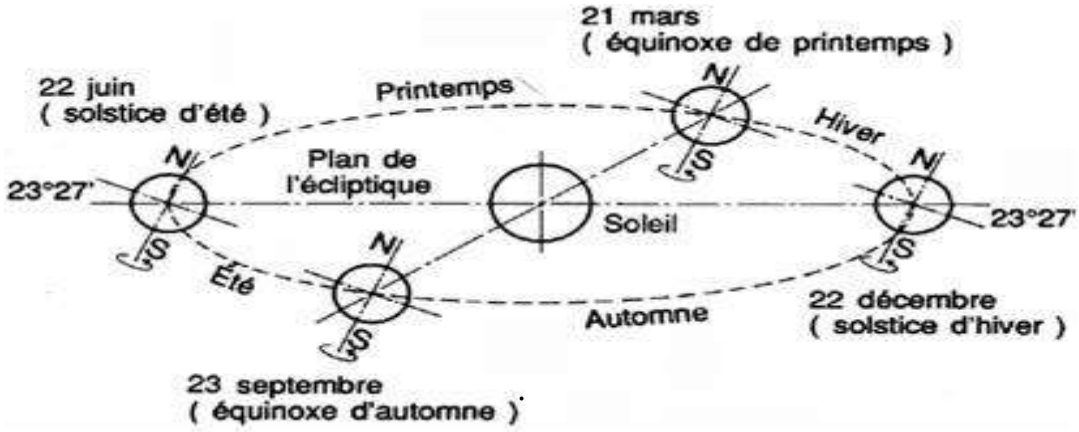


Figure I-9 : Le mouvement de la terre autour de soleil

I-4-3 La variation annuelle du rayonnement direct extraterrestre :

Le rayonnement direct I_{on} est l'éclairement reçu par un plan disposé sous incidence normale aux rayons solaires par unité de surface à la limite supérieure de l'atmosphère. Il est donné par l'équation (I-3) en watts par mètre carré

$$I_{on} = I_{sc}.\left(1+0.033.Cos\left(\frac{366.N}{365}\right)\right) \qquad \text{(I.3)}$$

Avec :

N : numéro d'ordre du jour dans l'année *1≤N≤365 ;*

I_{sc} : Constante solaire, la valeur la plus probable actuellement retenue est *1367 W/m2* ;

$E_0 = \left(1+0.033.Cos\left(\frac{366.N}{365}\right)\right)$: facteur de correction de l'excentricité de l'orbite terrestre ;

I-5 Les coordonnées du soleil :

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents:

•Par rapport au plan équatorial de la terre (repèreéquatorial).

•Par rapport au plan horizontal du lieu (repère horizontal).

I-5 -1 Coordonnées équatoriales :

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles (δ, *H*).

I-5 -1-a Déclinaison solaireδ :

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre, on adopte la convention de compter positivement les latitudes de l'hémisphère Nord (compris entre 0° à l'équateur et +90° au pôle Nord), et négativement celle de l'hémisphère Sud (compris entre 0°-90° au pôle Sud), et variée tout a u long de l'année entre deux valeurs extrêmes ±23.45°.

Les lois du mouvement relatif terre-soleil permettent de calculer les variations de la déclinaison au long de l'année. Pour la pratique, une formule d'approximation est suffisante, elle est donnée par l'équation (I-4) [18].

$$\delta = 23{,}45.\mathrm{Sin}\left(\frac{360}{365}(J-80)\right) \quad \text{(I.4)}$$

Ou avec plus de précision :

$$\delta = \mathrm{ArcSin}\left(0.389.Sin\left(\frac{360}{365}.(J-82)+2Sin\left(\frac{360}{365}.(J-2)\right)\right)\right) \quad \text{(I.5)}$$

Avec:

J : le numéro du jour de l'année compté à partir du 1 janvier, c'est à dire il varie de 1à 365 ou366 selon l'année.

δ : varie entre deux valeurs extrêmes :- $\delta_0 \leq \delta \leq +\delta_0$ avec $\delta_0 = 23{,}45°$.

La variation de la déclinaison du soleil au cours de l'année est représentée par la figure (I-10) [13].

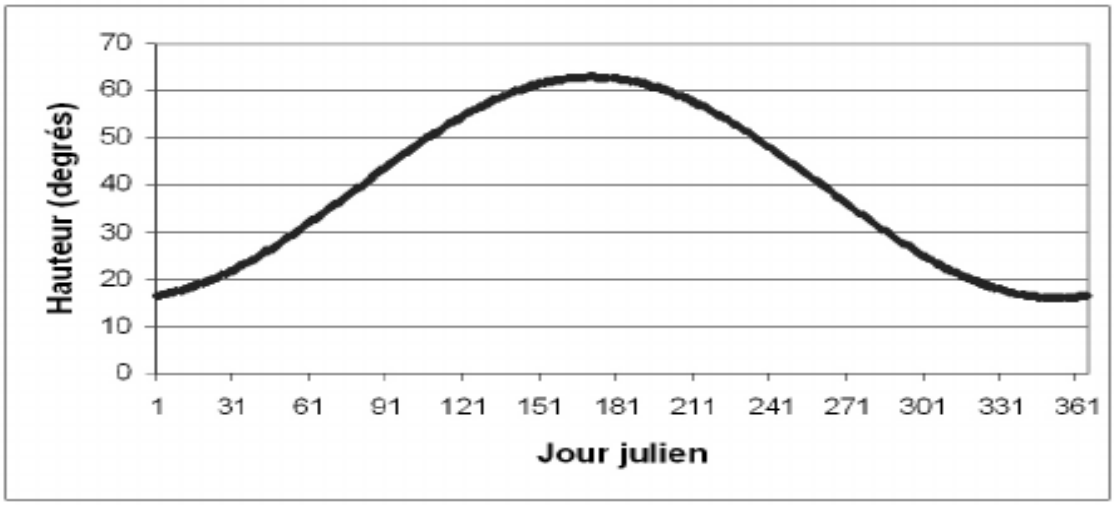


Figure I-10: Variation annuelle de la déclinaison du soleil

•δ = 0 (Equinoxes): Les équinoxes représentent les deux dates de l'année où le soleiltraverse le plan équatorial, l'équinoxe automnale, le 23 septembre, marquant le début de la chute de la durée de la journée, et l'équinoxevernal le 21 mars, marquant le début de l'accroissement de la durée du jour.

• $\delta = 23,45°$(au Solstice été) : Le solstice d'été (au 21 juin,) nous observons que le soleilest à son point le plus élevé dans le ciel. Elle marque le début de l'été dans l'hémisphère nordique.

• δ = -23,45° (au Solstice hiver) : Il coïncide avec le 21décembre.

***I-5 -1-b* Angle horaire du soleil H :**

C'est l'angle que font les projections de la direction du soleil avec la direction du méridien du lieu, l'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation

$$H = 15\left(TSV - 12\right) \quad \text{(I.6)}$$

Avec :

$$TSV = TI - TLI + \left(\frac{\Delta t + 4\lambda}{60}\right) = TL - \left(TU - \frac{\lambda}{15}\right) + \frac{\Delta t}{60} \quad \text{(I.7)}$$

$$\Delta t = 9.87\,\mathrm{Sin}2\left(\frac{360}{365}.(J-81)\right) - 7.35\mathrm{Cos}\left(\frac{360}{365}.(J-81)\right) - 1.5\mathrm{Sin}\left(\frac{360}{365}.(J-81)\right) \quad \text{(I.8)}$$

TSV (Temps Solaire Vrai) : Temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi.

TU (Temps Universel) : Le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.

TL (Temps Légal) : Temps donné par une montre.

Δt : Correction de l'équation du temps.

λ: longitude du lieu.

L'angle horaire H varie de -180° à +180° [16].

On prend:

H > 0 après midi.H < 0 le matin . H = 0 midi TSV

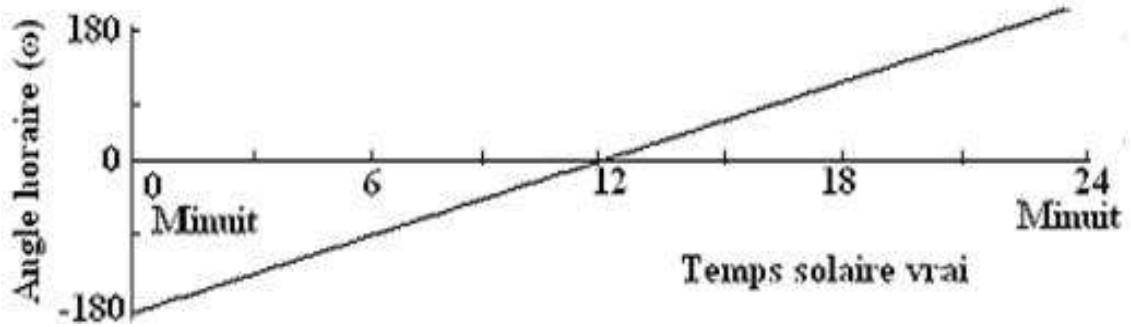


Figure I-11 : variation de l'angle horaire en fonction de temps solaire vrai

***I-5 -2* Coordonnées horizontales :**

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et vertical du lieu. Dans ce repère, les coordonnées sont la hauteur*h* et l'azimut *a*, figure (I-12) [16].

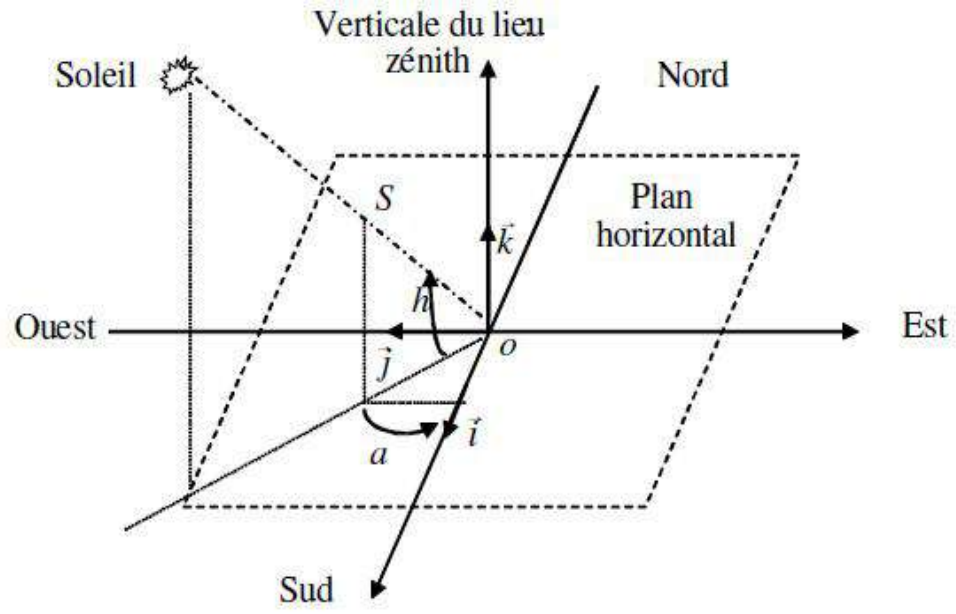


Figure I-12: Repère horizontal

I-5 -2 -a La hauteur du soleil (h) :

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante :

$$\text{Sin}(h) = \text{Cos}(\delta).\text{Cos}(\varphi).\text{Cos}(H) + \text{Sin}(\varphi).\text{Sin}(\delta) \qquad \text{(I.9)}$$

Avec :

h: varie entre -90° à $+90^{\circ}$.

On prend: $h > 0$ le jour, $h < 0$ la nuit et $h = 0$ aux lever et coucher.

I-5 -2 -b Azimut du soleil (a) :

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du Sud. L'azimut du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation suivante :

$$\text{Sin}(a) = \frac{Cos(\delta).Sin(H)}{Cos(h)} \qquad \text{(I.10)}$$

Avec: *a* : varie entre -180° à $+180^{\circ}$

On prend: $a > 0 \Rightarrow$ vers l'ouest, $a < 0 \Rightarrow$vers l'est et $a = 0 \Rightarrow$direction du sud.

I-6 Différents types de rayonnement :

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes figure (I-13).

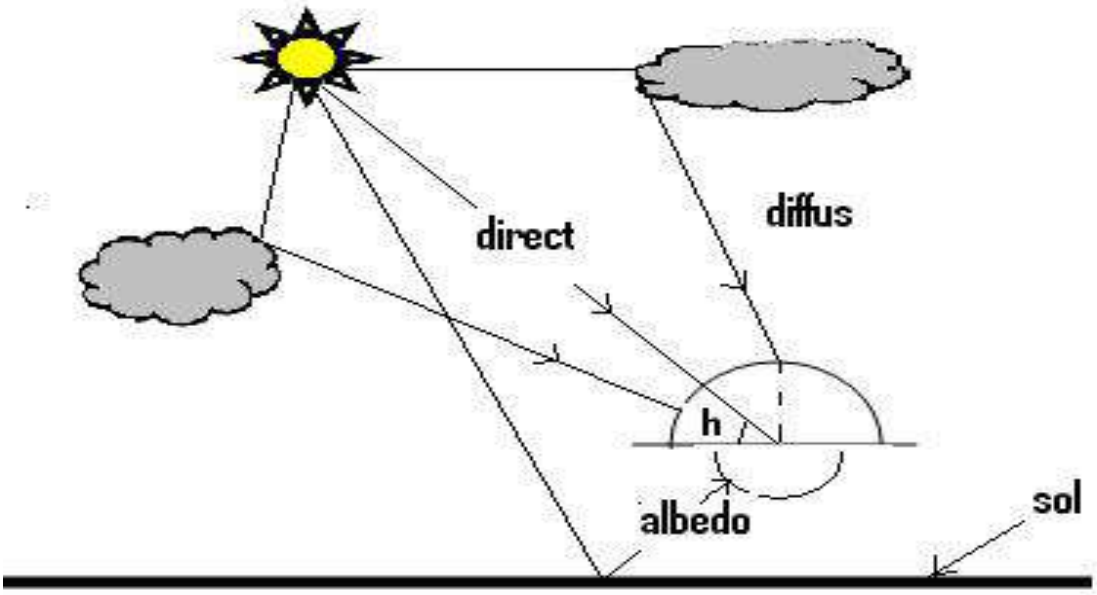


Figure I-13 : Différents composants de rayonnement

I-6-1 Rayonnement direct :

Le rayonnement direct est le rayonnement reçu directement du Soleil. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.

Le rayonnement direct reçu dans le plan du capteur est :

$$I_{(\alpha,\gamma)} = \text{I.Cos}(i) \qquad \text{(I.11)}$$

Avec : *I*: rayonnement direct normal

i = (Angle d'incidence) : c'est l'angle entre la direction du soleil et la normale au plan, Cet anglepeut être déterminé par la connaissance des cosinus directeurs du rayon incident $\vec{u}$ et la normale $\vec{n}$ en coordonnées horizontales [13]:

$$\vec{n}\begin{cases} Cos(\gamma).Sin(\alpha) \\ Cos(\gamma).Cos(\alpha) \\ Sin(\gamma) \end{cases} \vec{u}\begin{cases} Cos(h).Sin(a) \\ Cos(h).Cos(a) \\ Sin(h) \end{cases} \text{(I-12)}$$

Le produit scalaire de ces deux vecteurs détermine l'angle d'incidence *i* :

$$\text{Cos}(i) = \vec{n}\,.\,\vec{u} = \begin{pmatrix} Cos(\gamma).Sin(\alpha) \\ Cos(\gamma).Cos(\alpha) \\ Sin(\gamma) \end{pmatrix}.\begin{pmatrix} Cos(h).Sin(a) \\ Cos(h).Cos(a) \\ Sin(h) \end{pmatrix} \qquad \text{(I.13)}$$

$$\text{Cos}(i) = \text{Cos}(\gamma).\text{Sin}(\alpha).\text{Cos}(h).\text{Sin}(a) + \text{Cos}(\gamma)..\text{Cos}(\alpha).\text{Cos(h) Cos}(a) + \text{Sin}(\gamma).\text{Sin}(h) \qquad \text{(I.14)}$$

I-6-2 Rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, et de sa réfraction par le sol, il parvient de toute la voute céleste [17].

Le rayonnement diffus (D_h) est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions, Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil [14].

Dans le plan du capteur le Rayonnement diffus est donné par [15]:

$$D_{(\alpha,\gamma)} = \left(\frac{1+Cos(\alpha)}{2}\right).D_h + \text{Alb}\left(\frac{1-Cos(\alpha)}{2}\right).G_h \quad \text{(I-15)}$$

Avec :

Alb: albédo (coefficient de réflexion du sol)

h: hauteur de soleil [degré]

D_h : Diffus sur plan horizontal

G_h : Global horizontal

Pour un plan vertical $\Rightarrow D_v = 0.5.(H_h + \alpha.G_h)$

I-6-3 L'albédo ou Réfléchi :

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

$$\text{L'albédo (Alb)} = \frac{energieréflichi}{energierecu}$$

I-6-4 Rayonnement global :

Le rayonnement global au sol est donc fonction de la composition et de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons lumineux au cours de la journée. Il se décompose en rayonnement direct et rayonnement diffus, et ce sont ces deux rayonnements qui sont exploités par les générateurs solaires [17]

Dans le cas d'une surface horizontale, le rayonnement global s'écrit:

$G = I.Sin(h) + D_h$ (I-16)

Pour un plan quelconque, le rayonnement global est :

$$G_{(\alpha,\gamma)} = I_h.\frac{Cos(i)}{Sin(h)} + \frac{D_h}{2}.\left[1+Cos\left(\frac{\pi}{2}-\gamma\right)\right] + \frac{D_h}{2}.\text{Alb}.\left[1-Cos\left(\frac{\pi}{2}-\gamma\right)\right] \quad \text{(I-17)}$$

I_h : direct horizontal

7 - Conclusion :

Les données météorologiques concernant le rayonnement solaire ne sont généralement pas suffisantes pour pouvoir quantifier tous les phénomènes qui se produisent lorsqu'un panneau photovoltaïque reçoit de la lumière. Une bonne connaissance du gisement solaire s'avère nécessaire.

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

Chapitre II

Généralité sur les systèmes photovoltaïques

II.1 Introduction :

Tous les jours, le soleil fournit de l'énergie à la terre, on peut utiliser cette énergie gratuite grâce à une technologie appelée photovoltaïque, qui est une technologie qui convertit directement la lumière du soleil en électricité à travers des modules photovoltaïques composés de cellules solaires à partir de semi-conducteurs.

Dans ce deuxième chapitre, nous allons donner quelques rappels de notions sur les semi-conducteurs et une généralité sur les photovoltaïques, nous allons ensuite expliquer le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales.

II.2 Note historique :

Le mot « photovoltaïque » vient du mot grec « photos » signifiant lumière et du mot «Volta» qui est le nom de famille du physicien italien « Alessandra Volta » qui a découvert la pile électrique en 1800. C'est « Alexandre Edmond Becquerel » qui découvrit le principe de la conversion de la lumière en électricité en 1839. Il avait observé que certains matériaux faisaient des étincelles lorsqu'ils étaient exposés à la lumière. De là, il démontra qu'il s'agissait d'une conversion directe de la lumière en électricité [19].

Le Tableau (II.1) résume les événements importants de l'histoire du photovoltaïque [20]

1839	Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque
1883	Fritts réalise des cellules solaires de grande surface à base de Se
1954	Des rendements de 6% sont obtenus : Si (Bell Lab, USA) and Cu2S/CdS (Air Force, USA)
1955	Hoffman électroniques (USA) propose des cellules Si à 2 % de rendement à $1500/W
1958	Kearns et Calvin ont démontré l'effet photovoltaïque d'une cellule à base de MgPh
1970	Première cellule solaire à hétérostructuresGaAs élaborée par Alferov, Andrée et al. en URSS
1973	Première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université Delaware, USA ; à base de Cu2S
1980	La première cellule à base de Cu2S/CdS délivrant un rendement > 10%
1982	Première unité de production de 1 MW (Californie, USA) avec des cellules Arco Si
1985	Les cellules à base de Si donnent un rendement > 20% sous le rayonnement solaire

1994	Des rendements > 30 % avec des cellules à concentration multi jonctions à base de GaInP/GaAs (NREL, USA)
1996	Les cellules solaires hybrides à colorants atteignent un rendement de 11% (EPFL, Switzerland)
1998	Cellules couches minces Cu(InGa) Se2 atteignent un rendement de 19% (NREL, US)
2002	Le photovoltaïque installé mondial cumulatif atteint 2000 MW
2007	Cellules solaires organiques en structure tandem avec un rendement de 6,5 % (UCSB, USA)
2008	Un rendement homologué de 5,9% sur une surface active de 2 cm² obtenu par Heliatek, BASF et l'Institut de photovoltaïque appliquée (IAPP) de l'Université technique de Dresde (Allemagne)
2009	Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 6,1 % à base de PCDTBT et PC70BM (UCSB, USA)Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 7,4 % à base de PBDTTT-CF et PC70BM (SolarmerEnergy Inc., University of California, University of Chicago, USA

Tab (II.1): Evénements notables dans l'histoire du photovoltaïques.

II.3 Semi-conducteur :

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants, cette conductivité des semi-conducteurs, dépend fortement de leur pureté, des irrégularités de leur structure, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques. Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées [21].

La conductivité d'un semi-conducteur peut être augmentée par l'addition des impuretés dans sa structure cristalline appelée dopage.

II.3.1 Le Dopage :

Suivant le dopage on peut construire deux types des semi-conducteurs : type N et type P.

II.3.1.1 Type N :

Considérons par exemple les semi-conducteurs tétravalents tels que Silicium ou Germanium. Ils cristallisent dans une structure où chaque atome est relié à quatre atomes voisins par des liaisons covalentes, introduisons un atome ayant cinq électrons de valence (phosphore). Il prend la place d'un atome du cristal. Parmi les électrons de l'impureté, seulement quatre électrons sont nécessaires pour adapter l'atome dans la structure de cristal de

silicium et le cinquième restera libre et mobile; donc, dans cette région du cristal il y a beaucoup de charges négatives libres. Dans ce cas, le semi-conducteur est appelé type N[22-23].

II.3.1.2 Type P :

Si on introduit un atome d'impureté ayant trois électrons de valence (bore aluminium ou galium). Celui-ci ne peut saturer que trois liaisons. Ainsi une liaison par atome d'impureté manque c'est à dire il manque un électron dans la structure cristalline. Cet électron manquant pourrait également être considéré comme un «trou» avec une charge positive qui est mobile. Il y a beaucoup plus de trous libres que les électrons libres dans la région P, donc les électrons sont appelés les porteurs de charge minoritaires. Le semi-conducteur est dit de type P [22-23].

II.3.2 Jonction P-N :

Lorsqu'on met en contact un semi-conducteur de type N avec un semi-conducteur de type P, les porteurs majoritaires négatifs du coté N diffusent dans la région P, dans le même temps, les porteurs majoritaires positifs du coté P passent en régions N, donc, les porteurs se recombinent. Il existera ainsi, une charge positive dans la région N au bord de la jonction etune charge négative dans la région P au bord de la jonction; donc un champ électrique dans la jonction neutre électriquement vient à l'existence, cette jonction est appelée « jonction P-N ».

La jonction P-N est à la base du composant électronique nommé diode, qui ne permet le passage du courant électrique que dans un seul sens [24-25].

II.4 Photovoltaïque :

Le « photovoltaïque solaire » signifie « produire de l'électricité à partir de la lumière du soleil ». Tout élément photovoltaïque est un convertisseur d'énergie qui transforme la lumière en courant électrique [11].

II.4.1 Effet photovoltaïque :

La conversion photovoltaïque aujourd'hui largement utilisée peut être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. C'est un phénomène physique qui appelé « l'effet photovoltaïque ».

Cet effet repose principalement sur les trois mécanismes suivants :

• Absorption des photons incidents par le matériau constituant le dispositif.

• La conversion de l'énergie absorbée (du photon) en charges électriques libres (énergie électrique).

• Collecte des particules dans un circuit électrique extérieur [26-27].

II.4.2 Cellule photovoltaïque (PV) :

La cellule photovoltaïque est un dispositif optoélectronique capable de capter et convertir directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque » [20-26].

II.4.2.1 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque est illustré dans la figure (II.1). La structure la plus simple d'une cellule PV se compose de deux couches minces de semi-conducteur dopés différemment, l'une est constitué d'un semi-conducteur de type N et l'autre de type P et inversement, c'est à la jonction de ces deux couches que la cellule produit de l'électricité. Cette jonction est la jonction P-N qui représente le cœur de la cellule photovoltaïque[20-26].

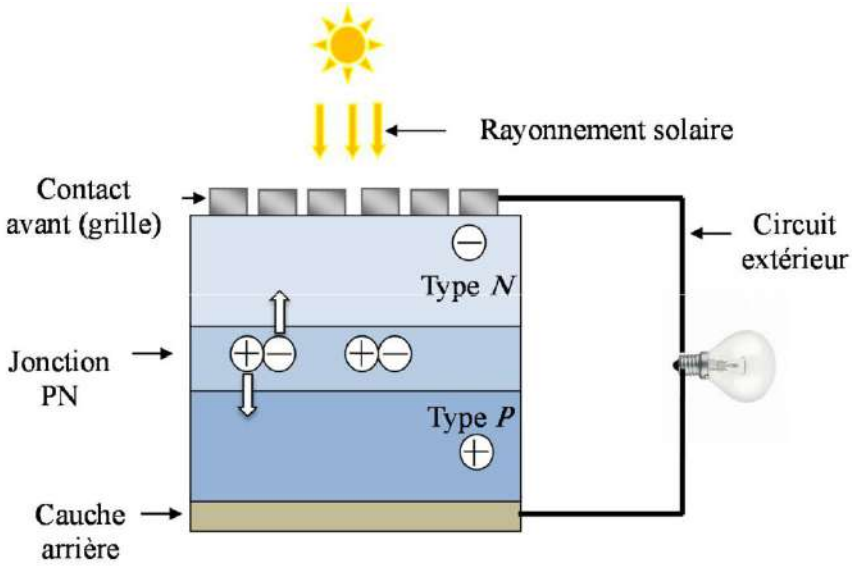


Figure II.1 : Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque lorsqu'elle est exposée au rayonnement solaire, un photon incident dans la jonction P-N arrache un électron et crée ainsi un couple libre d'électron-trou.
Sous l'effet du champ électrique, les électrons s'accumulent dans la couche dopée N, alors que les trous s'accumulent dans la couche dopée P. Cette réaction entraine alors une différence de répartition de charges créant ainsi une différence de potentiel électrique entre les deux couches de la cellule, c'est l'effet photovoltaïque [25]. En conséquence, un courant électrique peut circuler en connectant les bornes de la jonction à un circuit extérieur [20].

II.4.2.2 Les type des cellules photovoltaïques :

a- Cellules cristallines :

Ces cellules, généralement en silicium, ne comprennent qu'une seule jonction p-n
On distingue deux types de cellules cristallines:

• Cellules en silicium polycristallin :

Les techniques de production du silicium polycristallin sont beaucoup plus simples que celles du silicium monocristallin, et donc bien moins chères à mettre en œuvre. Néanmoins, la qualité de ce matériau est moins bonne à cause de la présence de joints de grains qui introduisent des zones fortement recombinantes et un taux assez élevé des impuretés métalliques et autres. Ces joints sont constitués par les surfaces adjacentes des grains d'orientations cristallographiques différentes et contiennent beaucoup de liaisons pendantes. Ils ont pour effet de réduire la durée de vie globale des porteurs. En outre, ces joints de gains bloquent le flux de porteurs et ils constituent une voie éventuelle d'un courant de fuite à travers la jonction. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux [28].



Figure II.2 : Photo d'un substrat de silicium polycristallin (échelle : 10×10 cm2) [28].

• Cellules en silicium monocristallin :

Les cellules au silicium monocristallin offrent le meilleur rendement parmi les panneaux solaires disponibles dans le commerce : entre 13 à 15%. Il faudra donc moins de cellules pour atteindre la puissance désirée, mais comme le silicium monocristallin est aussi le plus cher, son seul avantage est finalement d'utiliser une surface réduite : il faut environ 7m² pour obtenir 1 kilo-Watt-crête (kWc).



Figure II.3 : Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin [28].

b-Cellules à base de couches minces :

• Cellules en silicium amorphe :

Ses atomes sont donc agencés sans réelle organisation, ce qui leur permet de mieux capter la lumière (par rapport au silicium cristallin). Problème : les charges générées ont plus de difficulté pour se déplacer à cause de la désorganisation de la matière, ce qui se traduit par un mauvais coefficient de conversion. Par conséquent, leur rendement est faible. La désorganisation atomique a d'autres conséquences. Les électrons de valence des atomes de Si ne forment pas toujours des liaisons covalentes au sein du semi-conducteur. Il apparaît alors des liaisons pendantes qui peuvent dénaturer les propriétés électroniques du matériau. Pour limiter ce phénomène, les couches de silicium sont régulièrement passivées avec de l'hydrogène (a-Si:H). Des atomes d'hydrogène établissent des liaisons avec les électrons restés libres, et réduisent ainsi le nombre de liaisons pendantes [29].

• Cellules CIGS :

Les cellules CIGS renferment un absorbant composé de cuivre, de gallium, d'indium et de sélénium. Cette couche de 1 à 2,5 µm d'épaisseur étant dopée P, elle doit être recouverte d'un matériau de type N, par exemple du sulfure de cadmium (CdS). Tiens donc, du cadmium… mais sur une épaisseur de seulement 0,04 à 0,07 µm, autant dire qu'il est présent en infime quantité. Puisqu'il y a deux semi-conducteurs différents, les cellules CIGS sont elles aussi à hétérojonction.

Comme son homologue au silicium amorphe, la cellule CIGS résiste mieux à l'échauffement que les cellules au silicium cristallin, mais moins bien que les cellules au CdTe. En plus, elle capte un peu mieux la lumière en début et en fin de journée (quelques pour cent), comme toutes les couches minces [29].

• Cellules CdTe :

Le faible rendement des cellules à base de silicium amorphe ont motivé lesscientifiques à chercher des alternatives. Le matériau le plus prometteur est le tellure de cadmium (CdTe) qui offre la possibilité de produire des modules à des coûts plus faibles avec un rendement de 10%, et un avantage qui réside dans la forte absorption du tellure de cadmium. Cependant la toxicité du matériau freine le développement de cette technologie[29].

c-Cellules à haut rendement :

• Cellules à jonction :

- **Cellules tandem :**

Les cellules tandem sont obtenues à partir de deux cellules simples empilées l'une sur l'autre, par exemple, une couche mince de silicium amorphe empilée sur une couche silicium

cristallin. Ce tandem est censée optimiser le rendement comparé à celui produit par des cellules simples seules et ce qu'elles que soient leur caractéristiques, amorphes, cristallines ou microcristallines.

Il s'agit de l'empilement de deux cellules l'une sur l'autre. Ces deux cellules sont mises en série grâce à une couche de recombinaison des porteurs de charges.

La tension de circuit ouvert du dispositif est donc la somme des tensions de circuit ouvert des cellules si elles étaient prises seules, et le courant de court-circuit est le plus faible des deux cellules.

Cette structure offre l'avantage de pouvoir utiliser deux matériaux dont les bandes interdites (Spectres d'absorption) différent. Ce dispositif est capable d'absorber la somme des deux spectres d'absorption. Les couches actives peuvent être composées de mélanges polymère/fullerène ou de petites molécules. On peut par ailleurs utiliser différents types de matériaux dans les deux couches, ce qui donne une grande latitude quant à la fabrication de la cellule.

La première des cellules tandem était par exemple composée d'une couche de petites molécules évaporées pour la première cellule et d'une couche polymère déposée par voie humide pour la seconde. Par la suite, des cellules tandem utilisant différents matériaux ont été testées, jusqu'à atteindre des rendements de 6,7% grâce à l'utilisation d'une couche de recombinaison en TiOx et de deux polymères dont les bandes interdites sont différentes [30].

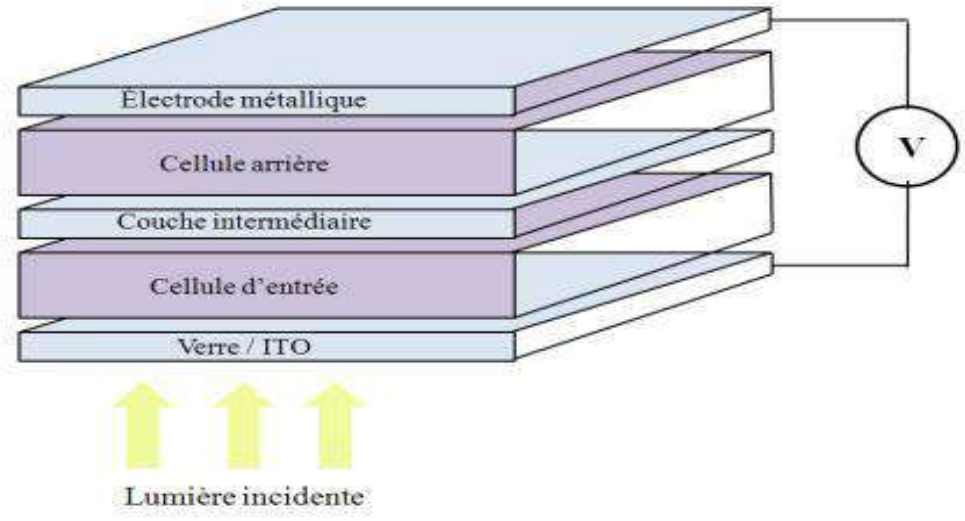


Figure II.4 : Schéma d'une structure tandem [30].

- **Cellules multi-jonctions :**

Les cellules multi-jonction sont constituées à partir de différentes couches minces, ce qui optimise le travail d'absorption des calories solaires, puisées plus largement, et ce qui permet un meilleur rendement et une plus grande production. Ce type de cellules n'est pas vendu à des fins commerciales et reste utilisée dans le domaine spatial. Et pour cause, les techniques d'exploitation sont très complexes. On parle de jet moléculaire ou d'épitaxie.

Le fonctionnement de ces cellules réside sur le même principe que celui des cellules Tandem. Les cellules multi-jonction sont composées d'un grand nombre de semi-conducteurs (GaAs, Ge, GaInP2...) possédant chacun un spectre limité. En choisissant des matériaux dont les longueurs d'onde limites sont les plus proches possibles les unes des autres, l'ensemble des cellules absorbe un spectre, le plus complet possible donnant à l'ensemble un rendement très élevé pouvant atteindre 50%. Le gros défaut de ces cellules est leur coût de fabrication, car aucune production industrielle n'a encore pu être mise en place.

Ces cellules limitent les pertes d'énergie car il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants. Ainsi il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants [31].

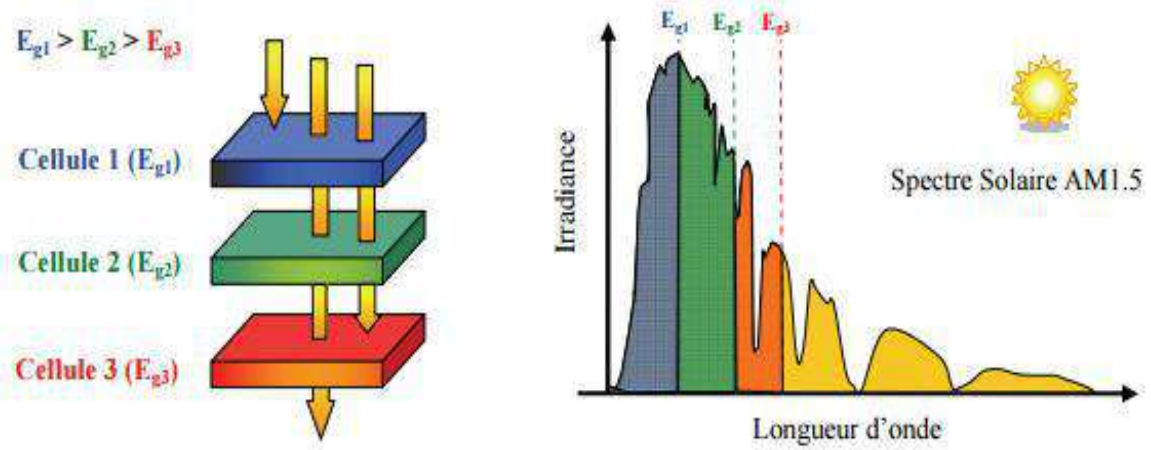


Figure II.5 : Principe de la cellule à hétérojonction[31].

En utilisant des concentrateurs solaires, certains pensent pouvoir baisser les prix (moins de surface de cellule utilisée) et prendre une place dans le marché conventionnel terrestre. Ainsi, si on compare le meilleur rendement sans concentrateur d'une triple jonction GaInP/GaAs/Ge atteignant les 32%, cette même cellule arriverait à 40.7% avec concentrateur. On peut même envisager des rendements encore plus importants avec des cellules complexes de 4 à 6 jonctions voir plus [31].

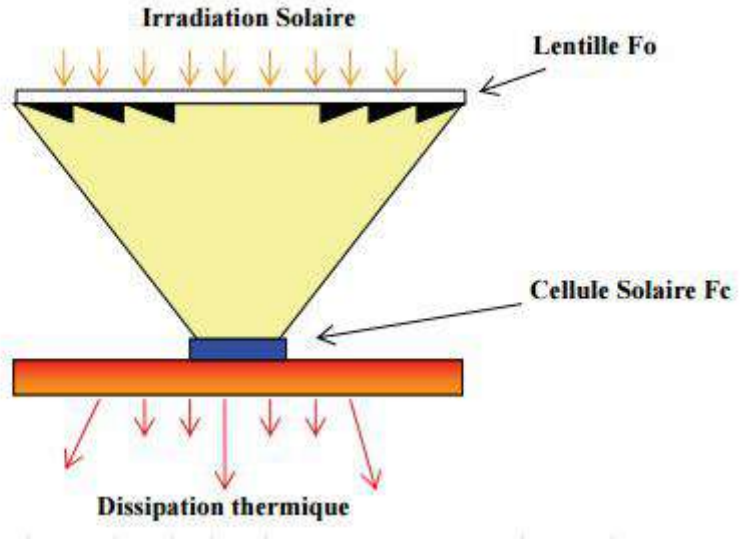


Figure II.6 : Schéma de principe d'un concentrateur photovoltaïque [31].

d- Cellules organique :

Face à la technologie utilisant les matériaux inorganiques, les cellules solaires à base de composés organiques connaissent un développement considérable. L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent beaucoup d'avantages : la possibilité d'être déposée en grande surface, la facilité de fabrication et de manipulation, la possibilité de réaliser ces cellules sur des substrats flexibles, et grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes. Elles possèdent en revanche à l'heure actuelle des durées de vie jugées inférieures à celles des cellules inorganiques, et des rendements de conversion plus faibles [32].

• Principe de fonctionnement :

Après absorption des photons par le polymère, des paires électron-trou liées (excitons) sont générées, puis dissociées. Compte tenu des limitations propres aux matériaux organiques (durée de vie des excitons, faible mobilité des charges), seule une faible fraction des paires électron-trou générées par les photons contribue effectivement au photo-courant. L'une des idées majeures est de distribuer en volume les sites de photo génération pour améliorer la dissociation des excitons.

Cette démarche est basée sur l'augmentation de la surface de la jonction, grâce à la mise en œuvre d'un réseau interpénétré de type donneur/accepteur (D/A) assurant le transport des trous (P+) vers l'anode (ITO) et le transport des électrons (e-) vers la cathode métallique (en aluminium Al, par exemple). Si le rendement quantique de séparation des charges photo-induites des systèmes associant un polymère semi-conducteur à un dérivé du fullerène (PCBM) est ainsi proche de l'unité, l'enjeu est désormais de limiter les phénomènes de

recombinaison et de piégeage qui limitent le transport et la collection des charges aux électrodes, afin d'augmenter l'efficacité globale des dispositifs qui demeure encore aujourd'hui faible (inférieure à 5%).

L'essor de la filière est également très fortement conditionné par la maîtrise et la compréhension des mécanismes de vieillissement des cellules mais aussi par la maîtrise des technologies en couches minces pour la protection des dispositifs vis-à-vis de l'oxygène et de la vapeur d'eau atmosphériques [33].

e-Cellules solaires sensibilisées par colorant : (CSSC)

Inspiré par la photosynthèse, l'équipe de Michael Grätzel a développé au début des années 90 des cellules solaires composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semi-conducteur inorganique. Le meilleur rendement certifié est de 10,4% pour une cellule de 1 cm^2, réalisé par la société Sharp [34].

• Principe de fonctionnement :

Comme dans le cas de la photosynthèse naturelle, l'absorption d'énergie solaire met en route une pompe à électrons mue par l'énergie lumineuse absorbée, dont le principe est illustré dans la figure ci-dessous.

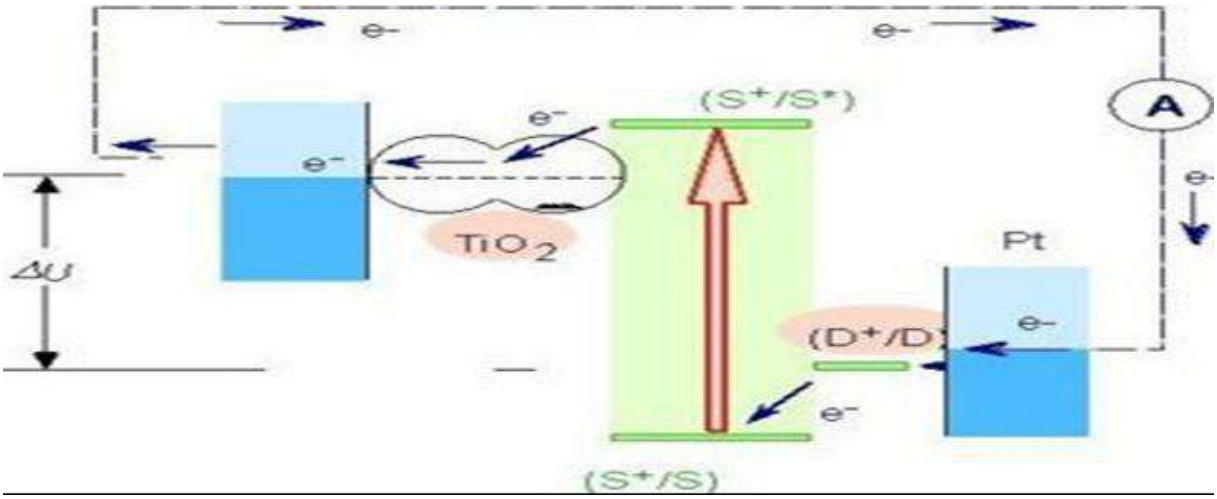


Figure II.7 : Schéma du principe de fonctionnement d'une CSSC [32].

Le sensibilisateur (S) est greffé à la surface d'un oxyde semi-conducteur sous la forme d'une couche mono moléculaire. Il absorbe les rayons solaires incidents qui le promeuvent dans un état électroniquement excité S*, d'où il est à même d'injecter un électron dans la bande de conduction du dioxyde de titane (TiO2).

Les électrons ainsi injectés traversent la couche et sont ensuite recueillis par un collecteur de courant qui permet de les diriger vers un circuit externe où leur passage produit de l'énergie électrique. Le retour de l'électron dans la bande de conduction sur le colorant oxydé S+ est beaucoup plus lent que la réduction de S+ par le médiateur (D) en solution.

De ce fait la séparation de charge est efficace. Le médiateur oxydé (D+) est réduit à la contre-électrode. La tension maximale débitée correspond à la différence entre le potentiel d'oxydoréduction du médiateur et le niveau de Fermi du semi-conducteur. La charge positive est transférée du colorant (S+) à un médiateur (iodure) présent dans la solution qui baigne dans la cellule. Ce médiateur, alors oxydé en tri-iodure, diffuse à travers la solution. Ainsi, le cycle des réactions redox est bouclé par transformation de l'énergie solaire absorbée en un courant électrique, sans changement de la composition de quelque partie du système que ce soit [32].

II.4.2.3 Architectures d'une cellule photovoltaïque :

a- Texturisation de la surface :

La réflexion est à l'origine de pertes importantes pour la cellule. La texturisation est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramide. Le relief crée permet d'augmenter la surface et induit les réflexions multiples sur les facettes des pyramides. La texturisation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité [35].

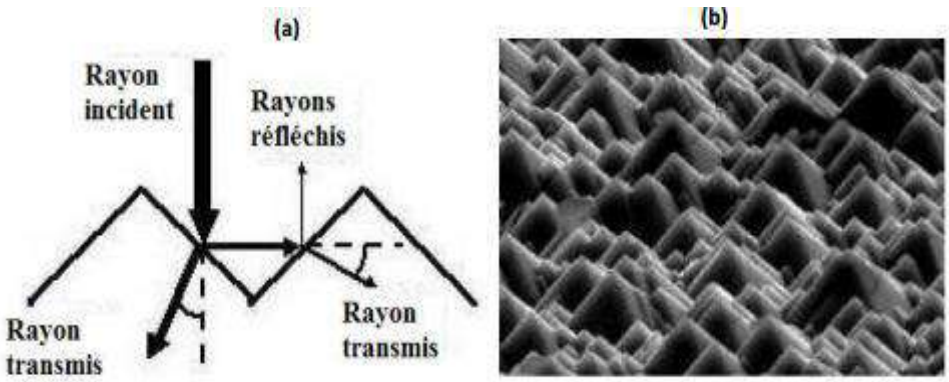


Figure II.8 : a) Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant sur une surface texturée ;
b) Plaque de silicium après texturation[35].

b- Les contacts face avant et face arrière :

Les contacts constituent la structure de collecte qui récupère et envoie les porteurs photogénérés vers le circuit externe. Pour assurer efficacement ce rôle, les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractérisation (I-V) du contact doit être linéaire.

La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmentes la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement. Différents procédés sont utilisés pour la réalisation des contacts. Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles en silicium multi-cristallin, les contacts sont généralement

réalisés par la sérigraphie. Dans le cas des cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodiques ou l'évaporation sous vide sont utilisées.

c- La couche antireflet :

Pour minimiser la réflexion de la lumière une couche antireflet (CAR) est utilisée.

L'épaisseur de la couche antireflet est égale à :

$$d_{car} = \frac{(2N+1).\lambda}{4n_{car}} \text{ (II-1)}$$

On obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et CAR/semi-conducteur. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux diélectriques). Différentes CAR sont utilisées en photovoltaïque : TiO2, SiO2, ZnS, ….. [36].

d- La passivation :

La surface des cellules est une source de recombinaison importante à cause des nombreux défauts cristallins présents liés à la discontinuité du cristal. La passivation consiste à améliorer la qualité électronique en surface et en volume du substrat, en neutralisant les sites actifs.

e- Champ électrique dans la zone arrière (BSF) :

Afin de collecter les paires électrons-trou créent par les radiations de grandes longueurs d'ondes du spectre solaire, on réalise un champ électrique par transition abrupte de dopage sur la face arrière de la cellule solaire, dans la zone même du contacte ohmique. Ce champ électrique arrière s'appelle BSF (Back Surface Field). Les porteurs excédentaires ainsi créent au voisinage de cette zone, au lieu de s'y recombiner, sont repoussés vers la région de charge d'espace de la jonction. Ils participent à la photo courant dans la mesure où la longueur de diffusion de ses porteurs de charges est plus importante que l'épaisseur totale de la couche de base de la cellule [35].

II.4.3 Association des modules photovoltaïques :

Dans la pratique les cellules solaires ne sont pas utilisées seules. Regroupées et liés électriquement entre elles, elles forment un module photovoltaïque. Ce module à son tour, regrouper et lié électriquement avec d'autres modules, ils forment un générateurs photovoltaïque. Ces modules peuvent être associés d'une des manières suivantes :

II.4.3.1 Montage en série :

Dans un montage en série les tensions s'additionnent et le courant traversant les modules reste identique. Lorsque les panneaux sont montés en série, l'intensité traversant les panneauxsera celle du panneau le moins performant de la série. Ainsi, si une ombre apparaît sur un des

panneaux, toute la série aura pour rendement celui du panneau le plus faible.

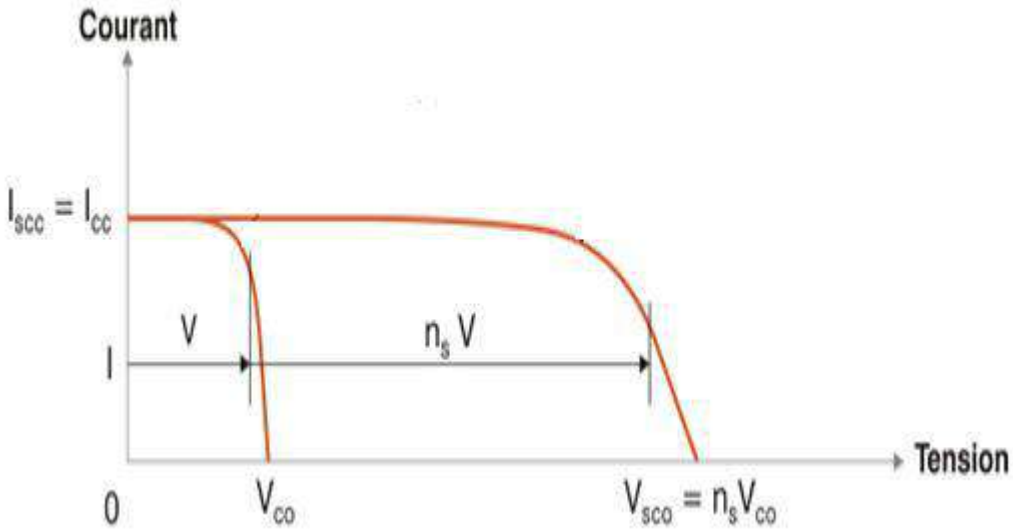


Figure II.9 : Caractéristique d'un groupement de modules PV en série [37]

II.4.3.2 Montage en parallèle :

Une association parallèle de n modules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur. Dans un groupement de modules identiques connectées en parallèle, les modules sont soumis à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants, figure II.10 résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de n modules [38].

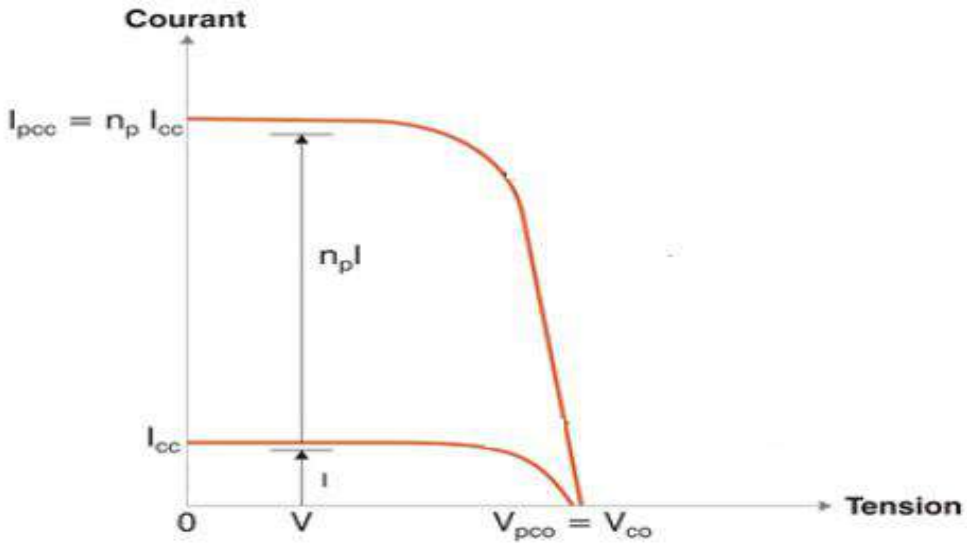


Figure II.10 : Caractéristique d'un groupement de modules PV en parallèle [37]

II.4.3.2 Montage mixte : (série + parallèle) :

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de montrer les panneaux en rangés de panneaux série et parallèle, afin de former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [35].

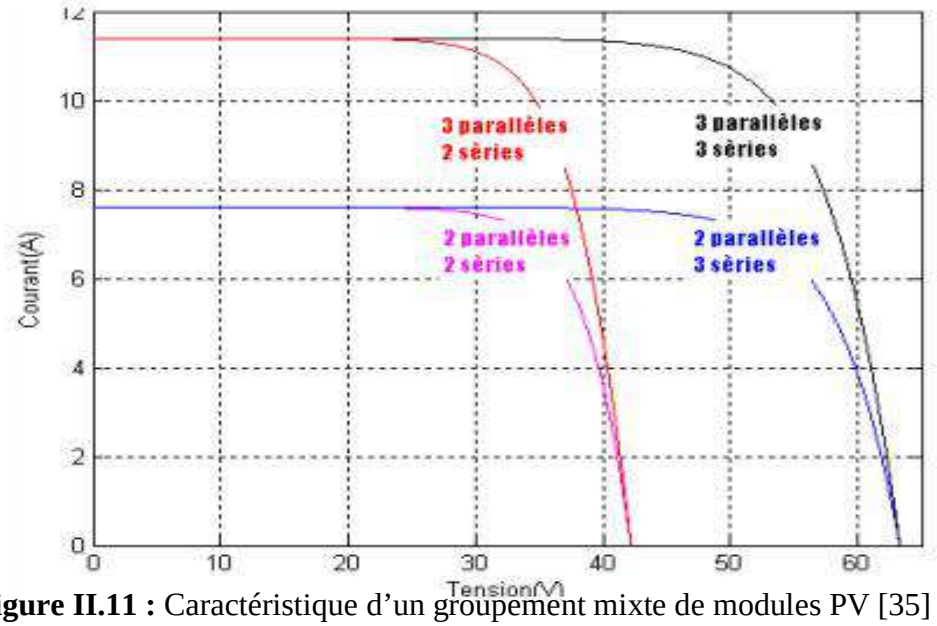


Figure II.11 : Caractéristique d'un groupement mixte de modules PV [35]

II.4.4.Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques :

II.4.3.1 Les avantages :

Les systèmes solaires électriques offrent de nombreux avantages, dont les suivants :

• Ils sont de fonctionnement sûr, non polluants et silencieux;

• Ils sont très fiables;

• Ils n'exigent presque aucun entretien;

• Ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales;

• Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre aux besoins en matière d'électricité;

• Ils ont une longue durée de vie importante.

II.4.3.1 Les inconvénients :

L'inconvénient majeur d'énergie d'origine photovoltaïque est le cas d'absence de l'ensoleillement, ciel couvert ou pendant la nuit, ce qui exige un stockage d'énergie produite par le système durant les jours ensoleillés sous forme chimique dans des accumulateurs, qui sont souvent des batteries à plomb, sachant que ces batteries impose la contrainte de décharge pas plus de 60% ou 70% au maximum de leur capacité maximal, l'énergie stockée n'est pas intégralement restituée, le coût additionnelle de système de stockage est capital en outre ses

système ont une durée de vie limitée de 3 à 5 ans, qui alourdit l'investissement [33].

II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions générales sur les systèmes photovoltaïques, le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ainsi que les différents types de cellule photovoltaïque. Cette dernière peut présenter par des différents modèles de circuits électriques qu'on va étudier sur le chapitre suivant.

Chapitre III

Modélisation d'une cellule photovoltaïque

III.1 Introduction :

La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toutes opérations d'optimisation du rendement. Le module photovoltaïque est représenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension [40].Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données de la fabrication. En conséquence, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations *I-V* à divers points de fonctionnement donnés par le constructeur ou issus de la mesure directe sur le module.

La modélisation de ces dernières s'impose comme une étape cruciale et a conduit a une diversification dans les modèles proposés par les différents chercheurs. Leurs différences se situent principalement dans le nombre de diodes, la résistance shunt finie ou infinie, le facteur d'idéalité constant ou non, ainsi que les méthodes numériques utilisées pour la détermination des différents paramètres inconnus [21].

III.2 Les paramètres électriques :

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont caractérisées par des nombreux paramètres électriques qui sont illustrés dans la figure (III.1), ou elle représente les deux caractéristiques courant-tension et puissance-tension qui permettre de déterminer les principaux paramètres du fonctionnement de cellule PV.

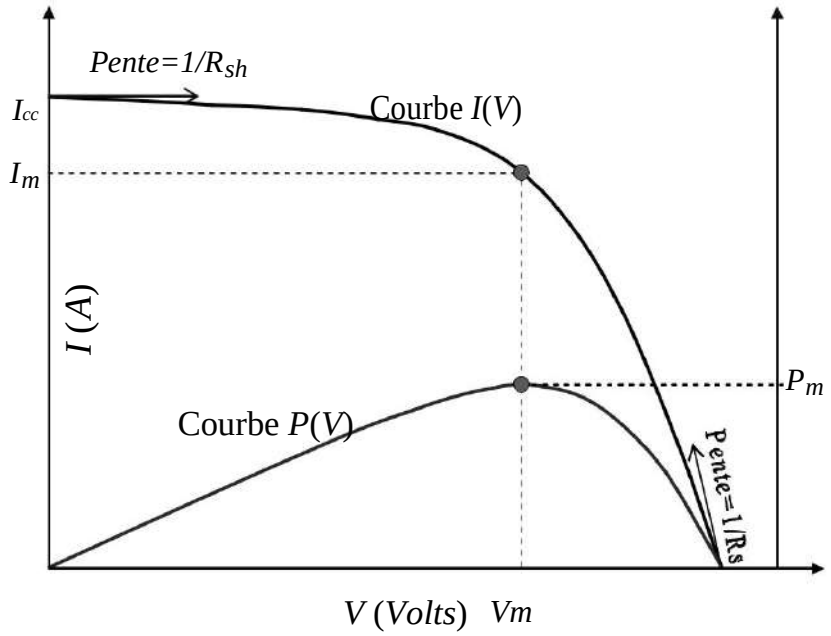


Figure III.1 : Les caractéristiques I(V) et P(V)

III.2.1 Le courant de court-circuit (I_{CC}) :

Le courant de court-circuit est la valeur maximale du courant lorsque sa tension est égale à zéro (V=0). Il augmente généralement avec l'intensité d'illumination et dépend : de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement incident, de la mobilité des porteurs et de la température.[41].

$$I_{CC} = \frac{I_{Ph}}{1 + \frac{R_S}{R_{Sh}}} \quad \text{(III.1)}$$

Avec :

R_S et R_{Sh} représentent les résistances série et shunt respectivement (Ω).

I_{PV} : Le photo-courant (A).

III.2.2 La tension de circuit ouvert (V_{CO}):

La tension à circuit-ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend du type de la cellule solaire, des matériaux de la couche active et de l'éclairement de la cellule.[41].

$$V_{CO} = \frac{KT}{q}.ln\left(1 + \frac{I_{Ph}}{I_S}\right) \text{(III.2)}$$

Où Is représente le courant de saturation de diode qui est donner par :

$$I_S = \frac{I_{CC}}{\exp\left(\frac{V_{CO}}{n.V_t}\right)} \text{(III.3)}$$

D'où

n : Facteur d'idéalité de diode

V_t : La potentielle thermodynamique qui est donner par :

$$V_t = \frac{KT}{q} \text{(III.4)}$$

Avec : k :(constante de Boltzmann) =1.381 x 10^{-23}J/K.

q :(charge de l'électron) =1.602 x 10^{-19}C.

T : Température absolue (K).

III.2.3 La puissance (P) :

LaLe point de fonctionnement est imposé par la résistance de charge et non par la cellule elle-même. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra donc d'obtenir la puissance maximale

$$P = V.I \qquad \text{(III.5)}$$

III.2.4 Facteur de forme (FF) :

Le facteur de forme (FF) définit l'efficacité de la cellule solaire, c'est le rapport entre la puissance maximale (Pmax) et le produit de tension V_{CO} et le courant Icc[41].

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{CO}.I_{cc}} \text{ (III.6)}$$

III.2.5 Le rendement (η)

Le rendement (η) des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance, c'est le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule (Pmax), et la puissance lumineuse incidente (Pinc) :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{inc}} = \frac{FF.V_{CO}.I_{CC}}{E.S} \text{ (III.7)}$$

Avec :

E : Eclairement ou flux incident (W/m^2)

S : Surface de la cellule photovoltaïque (m^2)

Ce rendement peut être optimisé en augmentant le facteur de forme (FF), le courant Icc et la tension V_{CO}. C'est un paramètre essentiel car la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule [32].

III.2.6 La résistance série (R_S) :

La résistance série (R_S) est l'un des facteurs les plus importants qui influencent la performance de la cellule PV, elle est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière [42]. La résistance R_S est l'inverse de la pente de la courbe courant-tension au point où (V>V_{CO}), et (I=0) comme il est illustrer sur la figure (III.1). La résistance R_S est donnée par l'équation suivante :

$$R_S = \frac{V_{CO} - V}{I} \text{ (III.8)}$$

Où :I : Le courant fournit par la cellule photovoltaïque (A).

V : La tension appliquée sur les bornes de la cellule photovoltaïque (V).

III.2.7 La résistance shunt (R_{Sh}) :

La résistance shunt (R_{Sh}) joue un rôle important dans l'influence de la performance d'une cellule PV.

La résistance (R_{Sh}) est l'inverse de la pente de la courbe courant-tension au point (0, I_{CC}) (voir figure III-1), elle est donnée par :

$$R_{Sh} = \frac{V}{I_{CC} - I} \quad \text{(III.9)}$$

III.2.8 Le facteur d'idéalité (n) :

Le facteur d'idéalité de la diode a été introduit par les chercheurs pour une cellule photovoltaïque à jonction P-N pour qualifier les mécanismes de conduction:

- n<1 : est associée à une recombinaison de type Auger (détermine le courant de saturation) dans une jonction sous des conditions de forte injection.
- n=1 : correspond à la jonction idéale qui est de suffisamment bonne qualité pour que les mécanismes de recombinaison dans la zone de charge d'espace aient des effets négligeables devant ceux de la diffusion.
- 1<n<2 : le niveau des pièges est décentré et n est alors dépendant de la polarisation.
- n=2 : la valeur particulière correspond au modèle de Sah, Noyce et Shockley… caractérise un niveau de centres recombinants central au gap et de distribution uniforme dans la zone de charge d'espace.
- n>2 : peut indiquer que la recombinaison s'effectue par des courants de fuite à la surface de la zone de charge d'espace (les effets de résistance aux shunts), et peut correspondre aussi à une distribution de pièges non uniforme avec une densité plus faible au milieu de la zone de charge d'espace [43].

III.3 Modélisation des cellules photovoltaïques :

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie .plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire. Résultant de celui des semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenantdans lecalcul de la tension et du courant du module photovoltaïque on présentera deux modèles du GPV :

– modèle à une diode ou (exponentiellement simple)

– modèle à deux diodes ou (double exponentielle)

L'hypothèse:

L'hypothèse qui est utilisée est que les grandeurs V_{OC}, V_{MP} et I_{MP} sont en fonctionuniquement de I_{SC} et de la température de fonctionnement des cellules T_J.

Autrement dit, lacourbe caractéristique I-V (qui donne le courant I en fonction de la tension V aux bornes ducapteur) est connue pour un couple (T_J, I_{SC}) donné et ne dépend ni de la distribution spectraledu rayonnement incident (fonction de AM) ni de sa distribution angulaire (fonction de l'angleβ).

III.3.1 Modèle à une diode :

La cellule photovoltaïque est représenté par le circuit électrique équivalent ci-dessousfigure (III.2). Qui se compose d'une diode ayant le courant de saturation Is et d'une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} qui dépend de l'éclairement, et aussi par les pertes qui sont modélisées par deux résistances une résistance shunt et une résistance série. [44]

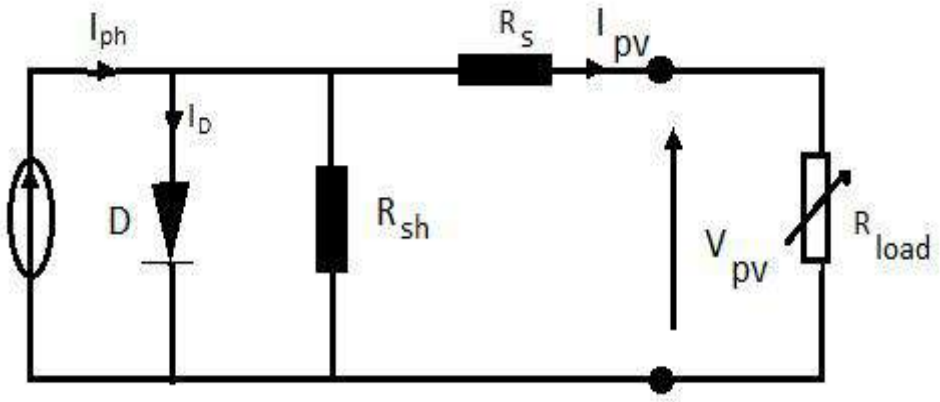


Figure III.2 – schéma du circuit électrique d'une cellule PV avec une diode

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_D - I_{R_{Sh}} \text{ (III.10)}$$

Avec:* I_{pv} : Courant délivré par la cellule * I_{ph} : Courant photo-courant

* I_d : Courant de la diode* I_{Rsh} : Courant délivré par la résistance R_{Sh}

Le courant passant par la résistance R_{Sh} est donné par :

$$I_{PV} = \frac{V_D}{R_{Sh}} \text{ (III.11)}$$

La diode étant un élément non linaire caractéristique I-V est donné par la relation :

$$I_D = I_S \cdot \left[e^{\left(\frac{V_D}{V_{\cdot th}}\right)} - 1 \right] \text{(III.12)}$$

$V_{th} = \dfrac{nKT}{V_{PV}}$ *:* représentantla potentielle thermodynamique de la cellule.

$V_D = V_{PV} + R_S \cdot I_{PV}$ *:* représente la tension délivrée par la diode.

I_S : Courant de saturation.

T_C : La température absolue.

K: la constante de Boltzmann $1.38.10^{-23}$ j/k.

n: facteur d'idéalité.

Le courant électrique délivré par la cellule est alors donnée par l'expression suivante [44]

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_S \cdot \left[e^{\left(q.\frac{V_{PV}+R_S.I_{PV}}{n.K.T_C}\right)} - 1 \right] - \frac{V_{PV} - R_S.I_{PV}}{R_{Sh}} \text{(III.13)}$$

En pratique, les paramètres de la cellule sont donnés (par le fabricant) dans des conditions de test standard (STC : Standard Test Conditions) ou nominales comme l'indique le tableau suivant[45] :

Conditions nominales	Conditions de Test Standard
Eclairement G_{nom} = 800W/m2	Eclairement G_0 = 1000W/m2
Température ambiante $Ta,_{nom}$ = 20 ◦ C	Température de la cellule T_0 = 25 C°
Vitesse du vent :1m/s	

Tableau III.1 : indique les conditions de test standard de la cellule.

Le photo-courant est proportionnel à l'éclairement et dépend aussi de la température, son expression est donnée par :

$$I_{Ph} = I_{CC} + K_i(T_C - T_0).\frac{G}{G_0} \text{(III.14)}$$

Avec :

K_i : Le coefficient de température de I_{Ph} (habituellement donné par le fabricantsur ledata-sheet).

$$.T_c = T_a + G\left(\frac{NOCT - 20}{800}\right) \quad \text{(III.15)}$$

Le courant de saturation dépend de la température. Sa valeur pour une température donnée est calculée par l'équation suivante :

$$I_S = I_{S0} . \left(\frac{T_C}{T_0}\right)^{\frac{3}{n}} \text{(III.16)}$$

Où :

E_g : est l'énergie du band gap.

Et : NOCT étant Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (Data-Sheet)

- **Calcul des Paramètres R_S , I_S :**

Nous avons :

$$I_{CC} = I_{Sat} . \left[e^{\left(q.\frac{V_{PV}+R_S.I_{PV}}{n.K.T_C}\right)} - 1 \right] + I_{PV} \text{ (III.17)}$$

Sachant qu'en circuit ouvert nous avons :

$$I = 0, I_{CC} = I_{Sat} . \left[e^{\left(q.\frac{V_{PV}+R_S.I_{PV}}{n.K.T_C}\right)} - 1 \right] \text{(III.18)}$$

Nous déduisons :

$$I_S = \frac{I_{CC}}{e^{q.\frac{V_{PV}+R_S.I_{PV}}{n.K.T_C}}} \text{ (III.19)}$$

Avec : $e^{q.\frac{V_{PV}+R_S.I_{PV}}{n.K.T_C}} >> 0$

Le facteur d'idéalité (n) va être utilisé pour définir le nombre de cellules du panneau photovoltaïque que l'on souhaite modéliser (n= n_{cell})

Au point de fonctionnement de la puissance (V_{pm} p/ I_{pm}), on peut écrire l'équation suivante :

$$I_{PV} = I_{CC} - I_S .[e^{q.\frac{V_{PV}+R_S.I_{PV}}{n.K.T_C}}] \text{(III.20)}$$

Au point de fonctionnement de la puissance (V_{pm} / I_{pm}), on peut écrire l'équation suivante :

$$I_{PV} = I_{CC} - I_S .[e^{q.\frac{V_{PV}+R_S.I_{PV}}{n.K.T_C}}] \text{(III.20)}$$

La valeur de Rs déduit de l'équation suivante :

$$R_S = n_{Cell}.V_{th}.\frac{\ln\left(\frac{I_{CC}-I_{PV\max}}{I_{Sat}}\right)}{I_{PPM}} - \frac{V_{PPM}}{I_{PPM}} \text{(III.21)}$$

A l'aide des donnés du Data-Sheet(voir l'annexe 1) l'application numérique est comme suite :

$V_{th} = \frac{n.K.T_C}{V_{PV}} = 25.75mV$

$I_{Sat} = 2.06.10^{-10}$

$R_S = 0.38ohm$

III.3.2 Modèles à deux diodes :

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci dessous figure (III.3). Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion parallèle de deux diodes ayant le courant de saturation I_{s1} et I_{s2}. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface de matériau et d'autre part dans le volume du matériau.

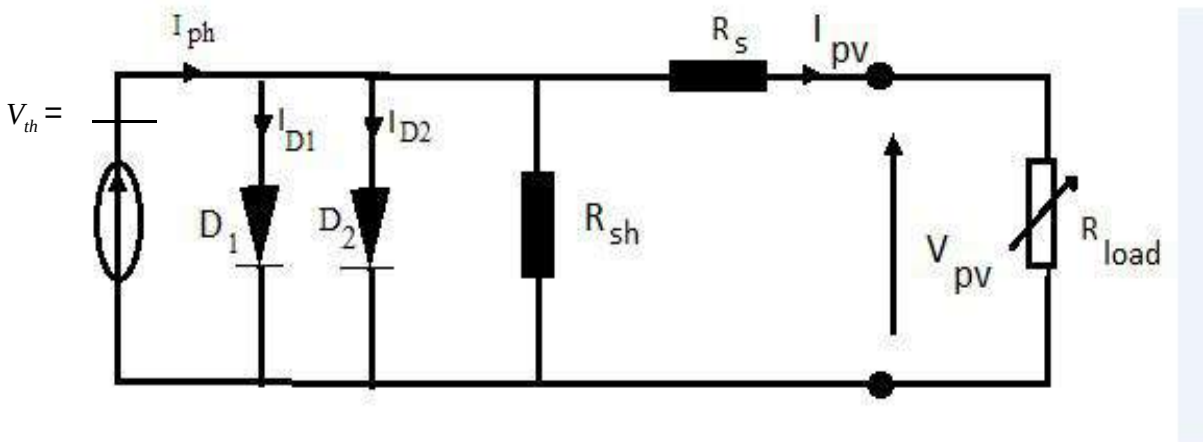


Figure III.3 – Schéma du circuit équivalent d'une cellule à deux diodes

En appliquant toujours la loi de Kirchhoff on a :

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{R_{Sh}} \text{ (III.22)}$$

Les courants de diodes sont donnés par :

$$I_{D1} = I_{S1} . \left[e^{\left(q.\frac{V_{PV}+R_S.I_{PV}}{n.K.T_C} \right)} - 1 \right] \text{ (III.23)}$$

$$I_{D2} = I_{S2} . \left[e^{\left(q.\frac{V_{PV}+R_S.I_{PV}}{2n.K.T_C} \right)} - 1 \right] \text{ (III.24)}$$

Les courants de saturation I_{S1} et I_{S2} sont donnés par les relations suivantes [45] :

$$I_{S1} = C_1 . (T_C)^{3n} . e^{\left(q.\frac{-Eg-q}{n.K.T_C} \right)} \text{ (III.25)}$$

$$I_{S2} = C_1 . (T_C)^{\frac{5}{2n}} . e^{\left(q.\frac{-Eg-q}{n.K.T_C} \right)} \text{ (III.26)}$$

Les constantes C_1 *et* C_2 sont généralement comprises entre (150-180).n K^{-3} et (1.3-1.7).10^{-2}. $K^{\frac{-5}{2}}$ Respectivement. [46]

En remplaçant les expressions de I_{Ph}, I_{D1}, I_{D2} et $I_{R_{Sh}}$ nous obtenons l'équation finale :

$$I_{PV} = \left[I_{CC} + K_i (T_C - T_0) \right] . \frac{G}{G_0} - C_1 (T_C)^{3n} . e^{\left(q\frac{-E_g-q}{nKT_C} \right)} . \left[e^{\left(q\frac{V_{PV}+R_S.I_{PV}}{nKT_C} \right)} - 1 \right] -$$

$$C_2 (T_C)^{\frac{5}{2n}} . e^{\left(q\frac{-E_g-q}{nKT_C} \right)} . \left[e^{\left(q\frac{V_{PV}+R_S.I_{PV}}{2nKT_C} \right)} - 1 \right] - - \frac{V_{PV} + R_S.I_{PV}}{R_{Sh}} \text{ (III.27)}$$

III.4 Conclusion :

Les caractéristiques électriques fondamentales de performances d'une cellule PV ont été décrites dans ce chapitre, ainsi que leurs circuits équivalents. Nous avons fait la modélisation pour les différents modèles mathématiques qui sont représentés par la caractéristique courant-tension d'une cellule PV.

Dans notre étude, il est important d'utiliser un modèle précis pour le fonctionnement de PV, pour cela dans le chapitre suivant on va faire l'étude d'un circuit équivalent pour un modèle à une exponentielle, et en utilisant le logiciel Matlab ont obtiendra la caractéristique (I-V) de la cellule, ensuite on étudiera l'influence de chaque paramètre sur les performances de la celluleen utilisant le logiciel Fortrant.

Chapitre IV

Simulation et discussion des résultats

IV.1 Introduction :

La simulation a été faite à l'aide du logiciel MATLAB, qui est un logiciel de manipulation de données numériques et de programmation dont le champ d'application est essentiellement les sciences appliquées. Son objectif, par rapport aux autres langages, est de simplifier au maximum la transcription en langage informatique d'un problème mathématique, en utilisant une écriture la plus proche possible du langage naturel scientifique et de développer des solutions nécessitant une très grande puissance de calcul. C'est aussi un excellent logiciel pour faires des simulations numériques [47].

IV.2 Simulation et discussion résultats :

En programmant en MATLAB (Annexe1) nous obtiendrons les résultats suivants :

IV.2.1 Caractéristique I-V :

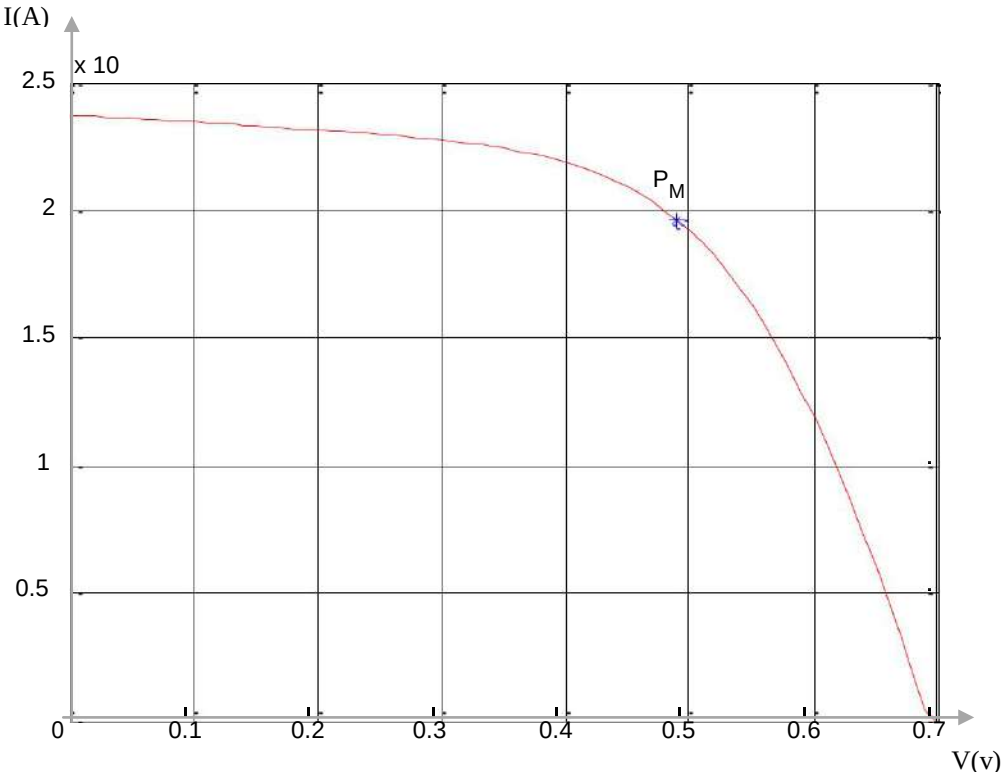


Figure IV.1: Caractéristique I-V d'une cellule solaire.

La courbe caractéristique I-V montre qu'une cellule solaire est une source de courant constante et de là nous pouvons tirer que le courant d'une cellule solaire est à sa valeur maximale qui est égale au courant de court-circuit I_{CC} pour V= 0. en suite la tension augmente avec la diminution exponentielle du courant électrique jusqu'à ce qu'il s'annule et la tension atteint sa valeur maximale qui est égale à la tension du circuit ouvert V_{CO}. Pour finir, le point en P_m représente le point de puissance maximale MPP (Maximum Power Point) qui correspond à desvaleurs de courant et de tension optimales.

IV.2.2Influence de la température sur la caractéristique I-V :

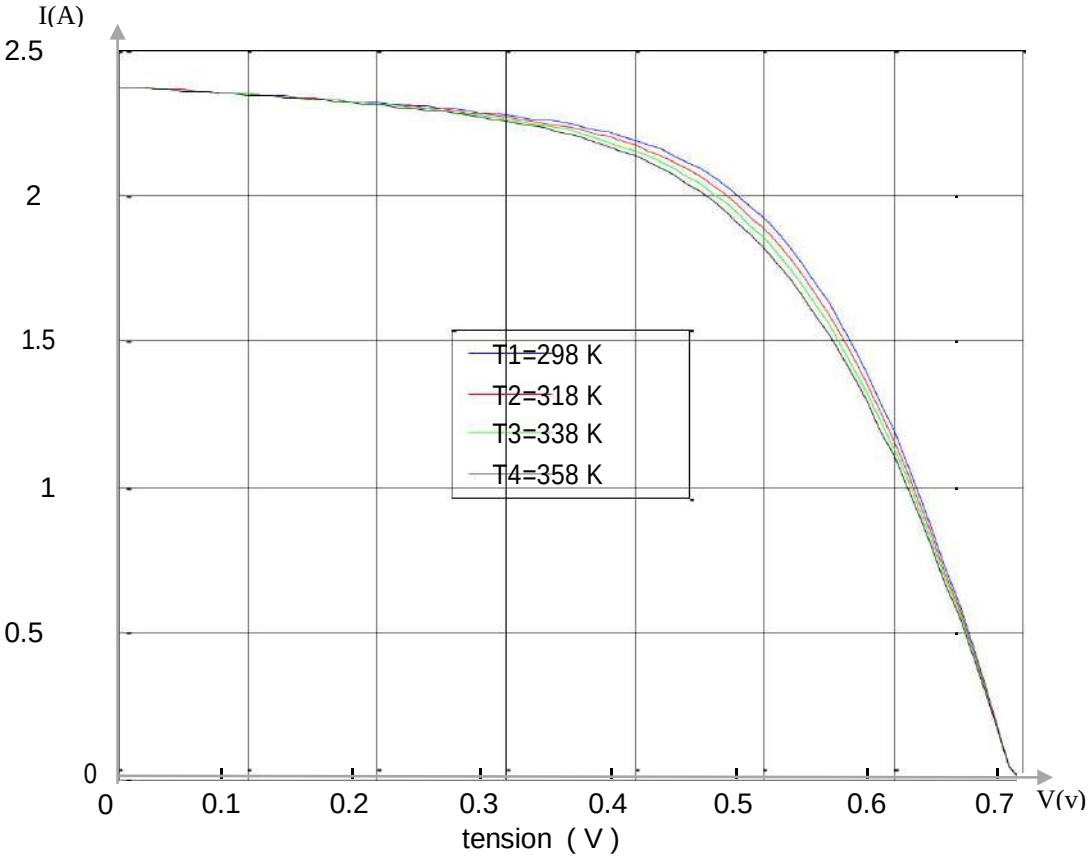


Figure IV-2 : Influence de la température sur la caractéristique I-V

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules. L'augmentation de la température engendre une diminution de la tension de circuit ouvert V_{CO} et de la puissance maximale $P_{\max}$, en revanche le courant de court-circuit I_{CC} augmente avec l'augmentation de la température

IV.2.3 Influence de la résistance série :

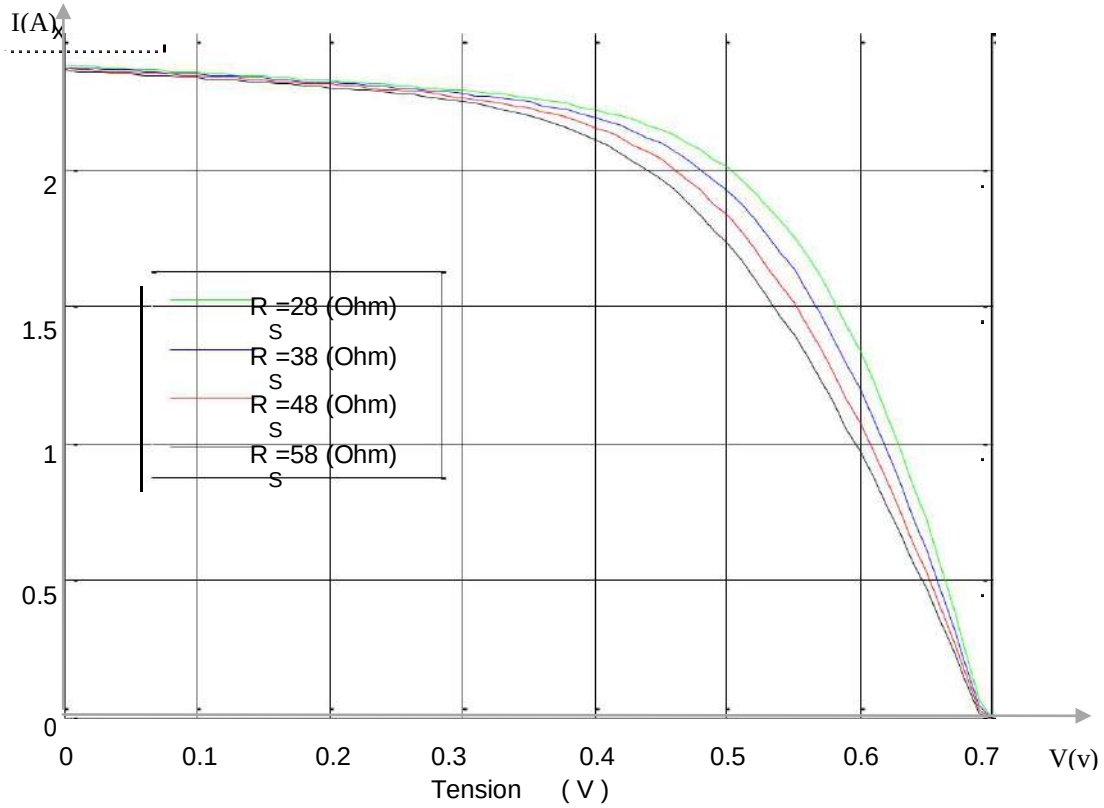


Figure IV.3: Influence de la résistance série sur la caractéristique I-V

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court- circuit I_{CC} , ce qui va limiter le rendement de conversion [48].

IV.2.4Influence de la résistance parallèle (shunt):

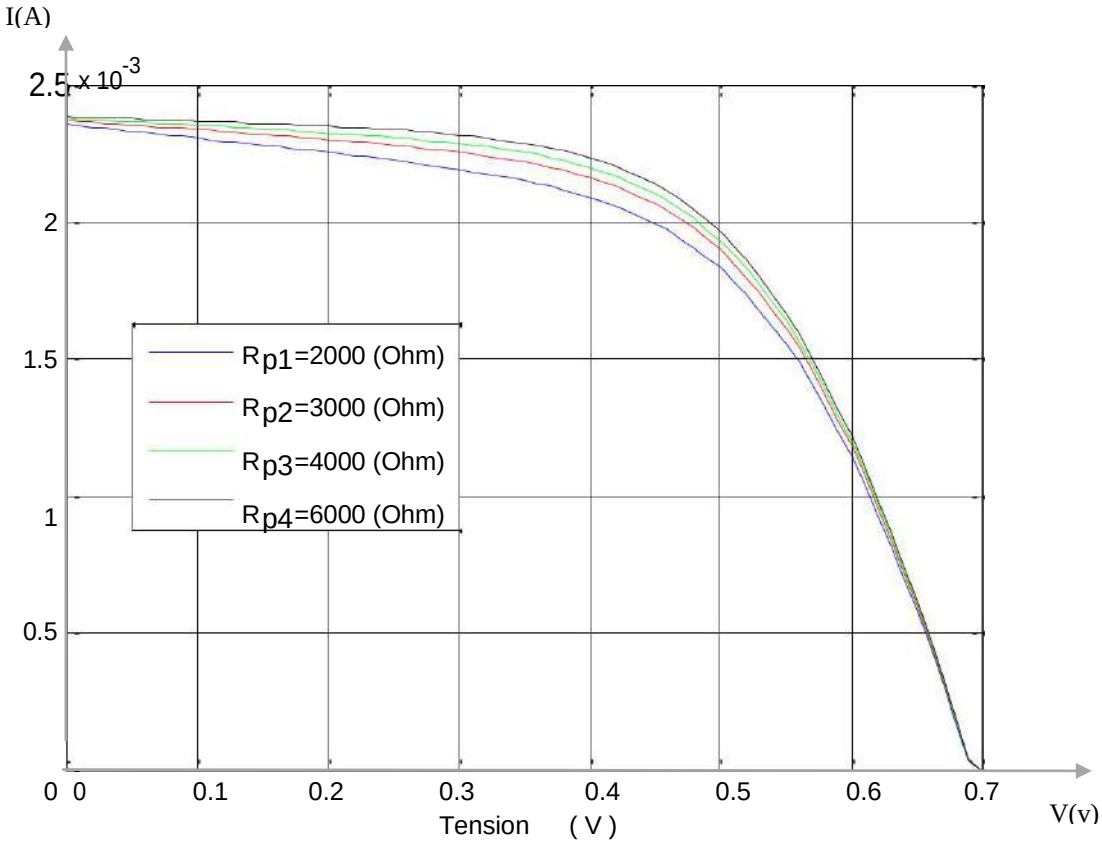


Figure IV.4 : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique I-V

La figure ci-dessus montre l'influence de la résistance en parallèle R_P sur la caractéristique *I-V* et de là on peut dire qu'avec l'augmentation de la résistance parallèle (R_P), La tension de circuit ouvert (V_{CO}) marque une légère diminution. Quand le courantde court-circuit (I_{CC}) augmente, on note une augmentation de la pente de la courbe *I-V*de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source decourant [48].

IV.2.5 Influence du facteur d'idéalité :

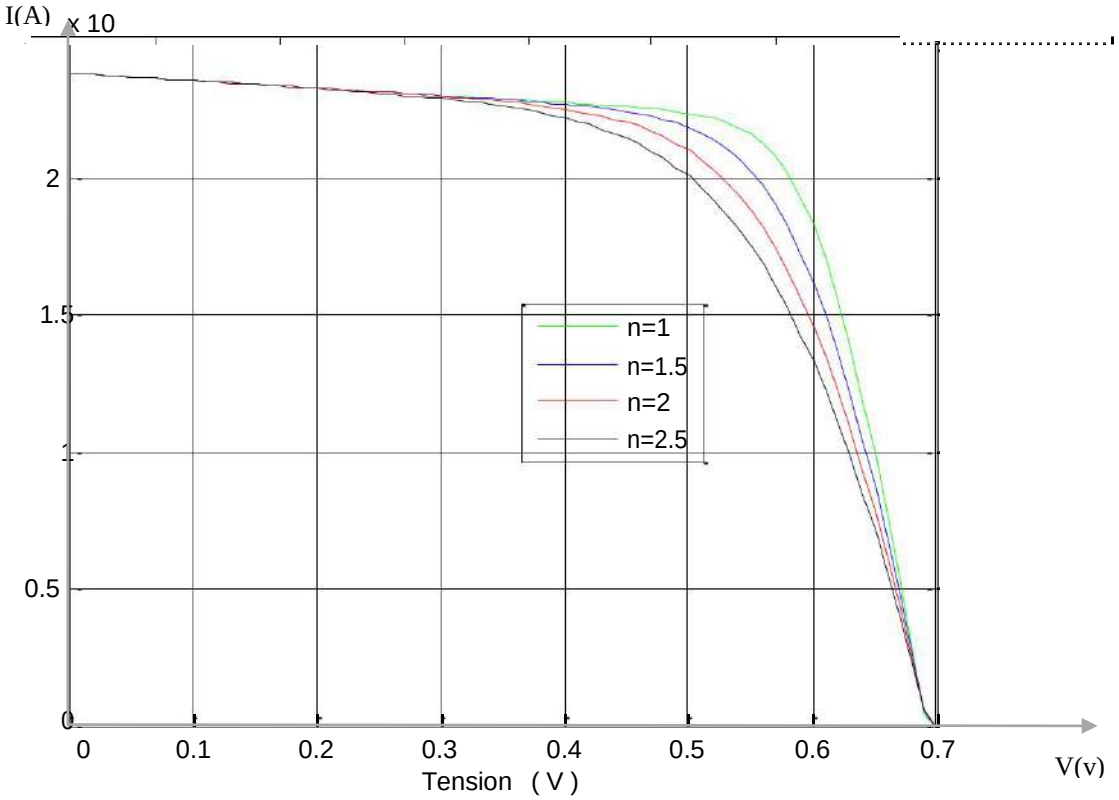


Figure IV-5 : Influence du facteur d'idéalité sur la caractéristique I-V

Les courbes montrent que l'augmentation du facteur d'idéalité augmente latension en circuit ouvert V_{CO} , en revanche le courant de court-circuit I_{CC} et la puissancemaximale P_m diminuent ce qui provoque la diminution du rendement.

IV.2.6 Influence du rayonnement solaire:

L'éclairement correspond à l'intensité lumineuse captée par le module photovoltaïque, et se mesure en W/m². La nuit, il est nul (0 W/m²). Il varie au coursde la journée entre 0 et 1 000 W/m² (valeur maximum), en fonction de la saison

En programmant en FORTRAN (Annexe 2) nous obtiendrons les résultats suivants :

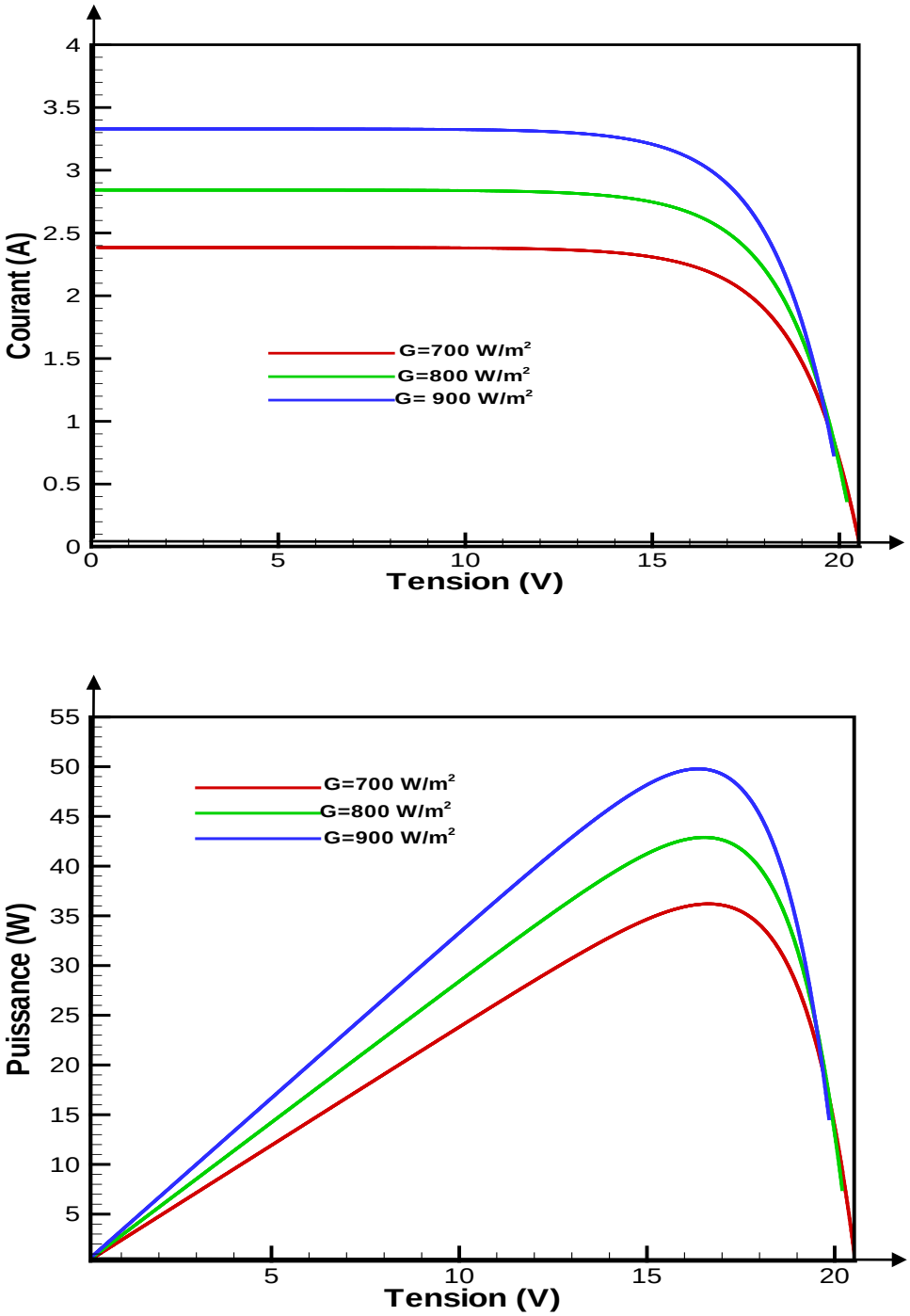


Figure IV.6 – La caractéristique I=f(v) et P=f(V) en fonction de l'éclairement

On remarque que le courant subit une variation importante, quand l'éclairement augmente le courant de court-circuit est augmente, mais par contre la tension varie légèrement. Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance, lorsqu'el l'éclairement est augmente.

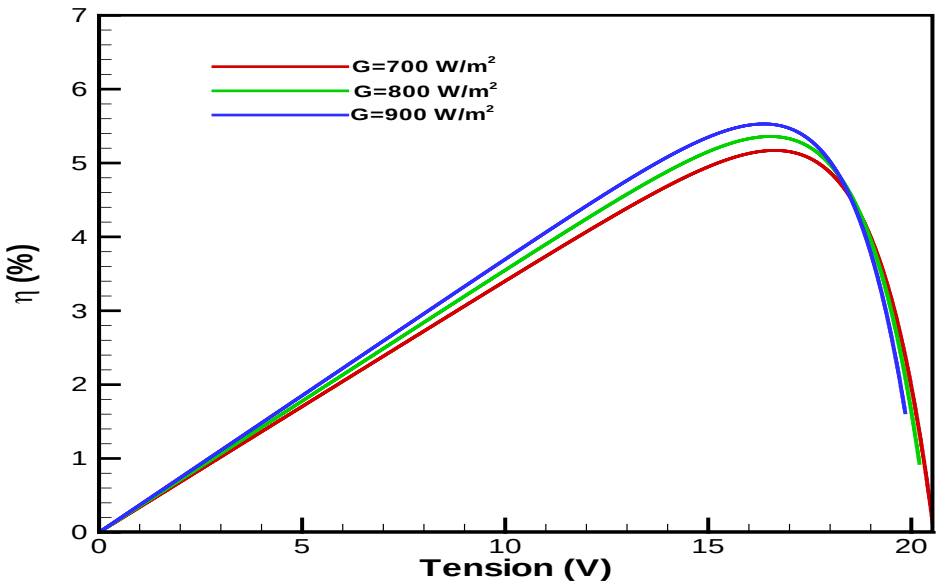


Figure IV.7: La caractéristique η=f(V) en fonction de l'éclairement

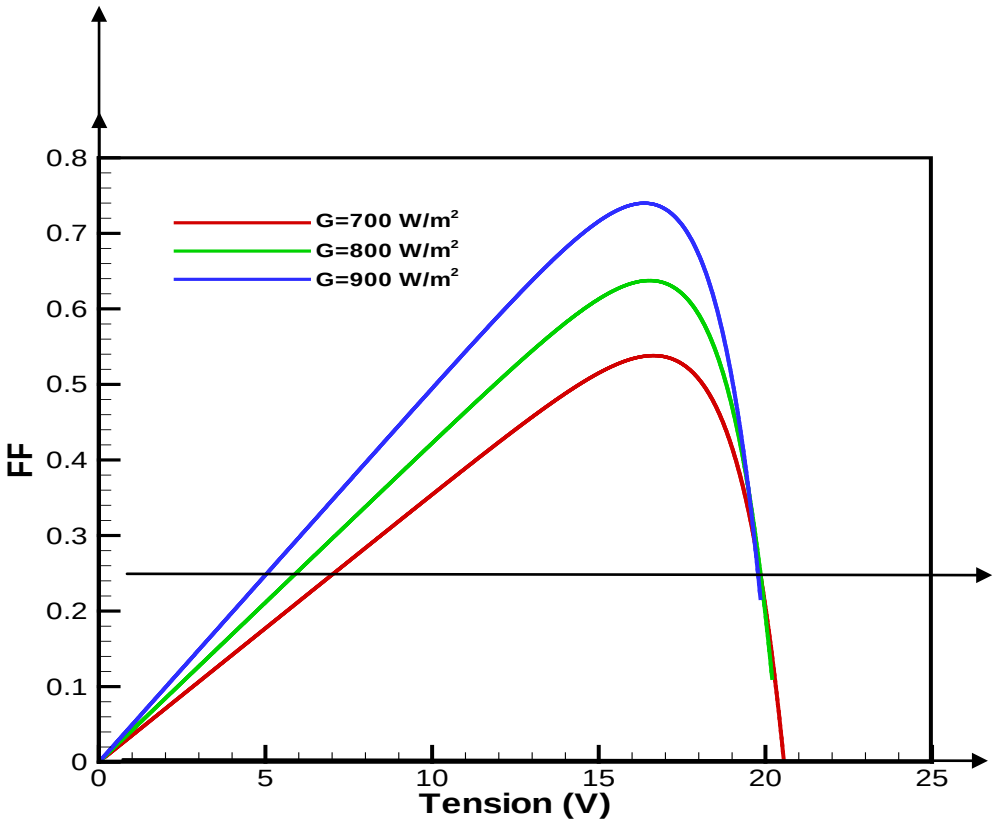


Figure IV.8 : La caractéristique FF=f(V) en fonction de l'éclairement

IV.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, Nous avons vu par le concept de la simulation l'influence de différents paramètres sur la caractéristique I-V de la cellule et cela dans le but d'améliorer et de développer les dispositifs photovoltaïque. , Nous avons vu ensuite sur le logiciel Fortran l'effet des changements climatiques sur les Caractéristiques (I(V) et P(V)) de la cellule PV.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent la modélisation d'une cellule photovoltaïque. L'étude est basée sur la simulation d'une modèle de la cellule photovoltaïque pour la détermination des caractéristiques I(V) et P(V) et influence des défirent paramètres sur ces caractéristiques.

En effet, pour la conception des systèmes photovoltaïques, la donnée la plus utile concernant les relevées mensuels du rayonnement global reçu par un panneau photovoltaïque solaire, ce dernier incliné par rapport à l'horizontal d'un angle correspondant à la latitude du lieu pour favoriser la captation de l'énergie 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 est influencée par plusieurs facteurs tels que : la température, le flux lumineux, la résistance shunt, la résistance série.

On a constaté d'après les résultats obtenus dans le deuxième chapitre que dans l'association des cellules en série, pour un courant constant ; la tension augmente, et dans l'association des cellules en parallèle, pour une tension constante ; le courant augmente.

Le fonctionnement d'une cellule solaire est régi par un modèle déduit à partir d'un circuit électrique équivalent, on rencontre dans la littérature plusieurs modèles en particulier les modèles simples diodes et les modèles double-diodes que leurs précisions restent tributaire de la modélisation mathématique des différents phénomènes physiques intrinsèques intervenant dans le processus de production d'électricité. La modélisation de ces dernières s'impose comme une étape cruciale et à conduit à une diversfixation dans les modèles proposés par les différents chercheurs. Leurs différences se situent principalement dans le nombre de diodes, la résistance shunt finie ou infinie, le facteur d'idéalité constant ou non.

La modélisation d'une cellule solaire est l'outil performant qui nous permettrapar simulation, de lier les caractéristiques photovoltaïques de cette cellule avec lespropriétés internes du matériau et la technologie de fabrication en vue d'améliorer les Performances de la cellule.

Enfin le travail entrepris dans le cadre de cette thèse ouvre une direction de recherche qui mérite à notre avis, d'être approfondi, en particulier :

- La variation de la température ou de l'éclairement présente une étude importante afin de bien comprendre l'influence de la résistance shunt sur la performance de la cellule photovoltaïque.
- De plus, il y a d'autres problèmes qu'on peut trouver, comme le cas où les cellules photovoltaïques dans un module sont partiellement ou totalement ombrées.

Bibliographie

Références bibliographiques

[1] SoltaneBelakehal « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables ». Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2010.

[2] Cabal. Cédric « Optimisation énergétique de étagel' d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.

[3] José Miguel Navarro « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible ».Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.

[4] RoshanakRadbeh «Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones ». Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2008.

[5] Thibaut Desrues « Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2009.

[6] Rémi Bettignies « Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués ». Thèse de doctorat,Ecole Doctorale d'Angers ,2003.

[7] Meekhun -Dariga« Réalisation d'un système de conversion et gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2010.

[8] AkassewaTchapoSingo « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome ».Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.

[9] Marcelo GradellaVillalva, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto RuppertFilho« ComprehensiveApproach to Modeling and Simulation of PhotovoltaicArrays ». IEEE Transaction on powrelectronics, Vol.24, No 5, 1198-1208, May 2009.

[10] ZouacheFoudil « Etude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïques ». Mémoire de magister en Electronique, Université Mentouri de Constantine 2009.

[11] Anne Labouret et Michel villoz « Energie solaire photovoltaïque ». Edition Lemoniteur(2005).

[12] RorniAbdelhalim « Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissancemaximale d'un panneau solaire ». Mémoire de magister en électrotechnique Université,Mentouri de Constantine 2009.

[13] BenisHalouma « Contribution à la modélisation du problème de Hot Spot dans les modules solaire Photovoltaïque occultées ». Mémoirede magister en électrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2008.

[14] BoudenAbdmalek « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de magister en électrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2008.

[15] Amina Benhammou « Optimisation d'un nouveau système de séchage solaire modulaire pour plantes aromatiques et médicinales ». Thèse de doctorat, Université de Abou BekrBelkaid Tlemcen, 2010.

[16] Bekkouche Sidi Mohammed El Amine « Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires ». Thèse de doctorat en Physique, Université de Abo BekrBelkaid Tlemcen, 2009.

[17] Souad Saadi « Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan ». Mémoire de magister en Physique, Université Mentouri de Constantine, 2010.

[18] Petibon Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.

[19] BELARBI MUSTAPHA. « *Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour siteautonome*». Thèse de Doctorat. Université Mohamed Boudiaf-Oran. (2015)

[20] Aoufi Saliha, « Modélisation et commande d 'un système de pompage photovoltaïque ».Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas-Sétif-1. (2014).

[21] Bendjellouli Zakaria, «Contribution a la modélisation d'une cellule solaire». Mémoire de Magistére. Université de Bechar. (2009).

[22] Brahmi Badr-Eddine Nabil, «Etude ab-inion des propriétés structurelles et électroniques des alliages ternaires des semi-conducteur II-VI à base de zinc». Thèse de Doctorat.Université Abou BakrBelkaid Tlemcen. (2013).

[23] Stefan C.W. Krauter, « Solar Electric Power Generation – PhotovoltaicEnergySystems».Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2006).

[24] Belkacem Mourad, « Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique enconversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT) ». Mémoire de Master. Université Abou BekrBelkaid-Tlemcen. (2015).

[25] Elsy Mansour, « Modélisation des panneaux photovoltaïques sur compact rio ». Projet de Fin d'Etudes.Université Libanaise. (2012).

[26] Ben Salem Salah Eddine, « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires ». Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas-Sétif. (2011).

[27] Ferouani Abdelmadjid, « Etude par Simulation et Modélisation Electriques des Cellules Photovoltaïques en Couche Mince à base de Cu (In,Ga)Se2(CIGS) ». Thèse de Doctorat. Université Abou BekrBelkaid-Tlemcen. (2016).

[28] N. BANDADLA, optimisation des émetteurs sélectifs et passivables des cellules solaires coventionnelles à base de mc_si, mémoire de magister, université de Tlemcen, 2012.

[29] K. AMARA, Contribution à l'étude d'une conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension, thèse de magister, université de Tizi- Ouzzou, 2015.

[30] M. C. ABDELLI, Etude des cellules photovoltaïques organiques, mémoire de master, université de Tlemcen, 2013. 85

[31] S. PETIBON, Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, thèse de doctorat, université de Toulouse, 2009.

[32] M. BELARBI, Modélisation des paramètres électriques d'une cellule solaire sensibilisée par colorant, mémoire de master, université de Tlemcen, 2013.

[33] CLEFS CEA - N° 50/51 - HIVER 2004-2005.

[34] F. NEMMAr BELHOCINE, Etude et réalisation de cellules solaires photovoltaïques à base de matériaux organiques, thèse de doctorat, université de Tizi- Ouzzou.

[35] M. LASLAD, simulation numérique des cellules solaires troisième génération pour des applications spatiales, thèse de magister, université de Sétif, 2014

[36] M. BOUNOUAR, Etude de la purification du silicium destiné à la réalisation des cellules photovoltaïques, thèse de magister, université de Tizi-Ouzzou.

[37] http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16696

[38] M. MISSOUM, Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie, thèse de magister, université de Chelf, 2011.

[39] BENCHERIF Mohammed. « Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens, intégration dans un système hybride basse tension ». Thèse de Doctorat. Université Abou BekrBelkaid Tlemcen. (2013)

[40] A. Zerga, B. Benyoucef and J.P. Charles, Insufficiencies of the Single Exponential Model and Efficiency of the Double Exponential Model in the Optimization of SolarCellsEfficiency, Active and Passive Electronic Components, Vol. 21, pp. 265 - 278, 1998.

[41] PAULESCU Marius, PAULESCU Eugenia, GRAVILA Paul, et al. « Weathermodeling and forecasting of PV systemsoperation ». Springer-Verlag London (2013)

[42] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud et I. Youm. « Etude et modélisation d un générateur photovoltaïque ». Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 473-483

[43] CHARLES Jean-Pierre, HADDI Ahmed, MAOUAD Alain, et al. « La Jonction, du Solaire à la Microélectronique ». Revue des Energies Renouvelables, 2000, vol. 3, p. 1-16.

[44] J.A. Gow and C.D. Manning « Development of a PhotovoltaicArray Model for Use inPower Electronics Simulation Studies ». IEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol. 146, N°2, pp. 193 - 200, 1999

[45] M.S. Aït Cheikh et al « Mise au point d'une régulation floue pour serre agricole à énergie solaire » Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°3, pp 421-443 ,2010.

[46] L.A. Hecktheuer, A. Krenzinger and C.W.M. Prieb « Methodology for PhotovoltaicModules Characterization and ShadingEffectsAnalysis ». Journal of the BrazilianSociety of Mechanical Sciences, Vol. 24, N°1, pp. 26-32, 2002.

[47] P. BONNET, Outils de simulation Partie : Matlab, université de Lille 1, 2009-2010.

[48] M. Belarbi, A. Benyoucef, B. Benyoucef, Study of the equivalent circuit of aDyeSensitizedSolarCells, Advanced Energy: An International Journal (AEIJ), Vol. 1, No. 2, April 2014.

[49] Direction des Energie Nouvelles et Renouvelable«Guide des Energies Renouvelables»Ministère de l'Energie et des Mines, Algérie, édition2007.

[50] F.Hananou et AI.Rouabah. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque .Mémoire de Master Académique, Université KASDI MERBAH OUARGLA, 2014.

ANNEXE 1

bp solar

Module Photovoltaïque - 80 Watt

BP 380

4017E-2 02/04

Le BP 380 est un module photovoltaïque de 80W particulièrement abouti, utilisant des cellules multicristallines avec couche anti-reflet SiN. Ce module solaire est aussi bien adapté pour les applications connectées au réseau, telles que le petit résidentiel ou les toitures de grands bâtiments commerciaux, que pour les applications traditionnelles : les systèmes de télécommunication et d'électrification rurale. Le BP 380 offre un rapport qualité prix de premier ordre grâce à sa fiabilité, sa feuille arrière en Tedlar blanc et ses 36 cellules multicristallines à haut rendement.

Performance

Puissance nominale	80W
Rendement module	12.6%
Tension nominale	12V
Garantie	90% puissance de sortie garantie 12 ans. 80% puissance de sortie garantie 25 ans.

BP 380S	Cadre Universel Clair avec des câbles de sortie et des connecteurs Multicontact (MC) polarisés.
BP 380L	Version laminée de BP 380S sans cadre
BP 380H	Cadre Universel Clair et boîte de dérivation robuste

Paramètres d'essai de qualification

Cyclage en température	-40°C à +85°C pour 200 cycles
Tenue chaleur humidité	humidité relative de 85% et de 85°C pour 1000h
Essai de charge statique avant et arrière (par exemple : vent)	2400 Pa
Essai de charge avant (par exemple: neige)	5400 Pa
Test impact grêle	25mm de diamètre avec une vitesse de 23m/s à une distance de 1m

Qualité et Sécurité

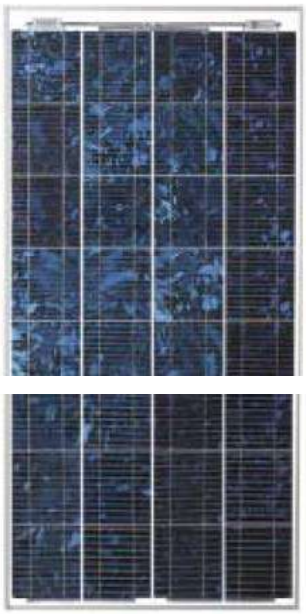
- Construit en usines certifiées ISO 9001 et ISO 14003
- Conforme aux directives de la Communauté européenne 89/33/EEC, 73/23/EEC, 93/68/EEC
- Certifié IEC 61215

Les mesures de puissance de module sont calibrés par ESTI sur la base des références radiométriques mondiales (Installation Solaire Européenne d'essai à Ispra, Italie)

Les modules avec cadre sont certifiés par TÜV Rhénanie à titre d'équipement de Classe II (IEC60364) de sûreté pour l'usage dans les systèmes jusqu'à 1000 VCC

Modules avec cadre testés par Underwriter's Laboratories pour la sécurité électrique et la tenue au feu (catégorie tenue au feu C)

Laminés testés par Underwriter's Laboratories pour la sécurité électrique et la tenue

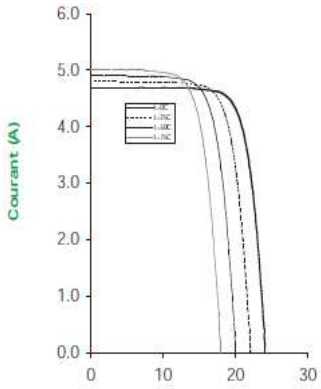


BP 380S echelle 1:14

Rendement(%)

9-11	11-12	12-13	13-14	14-15

BP 380 Courbes IV

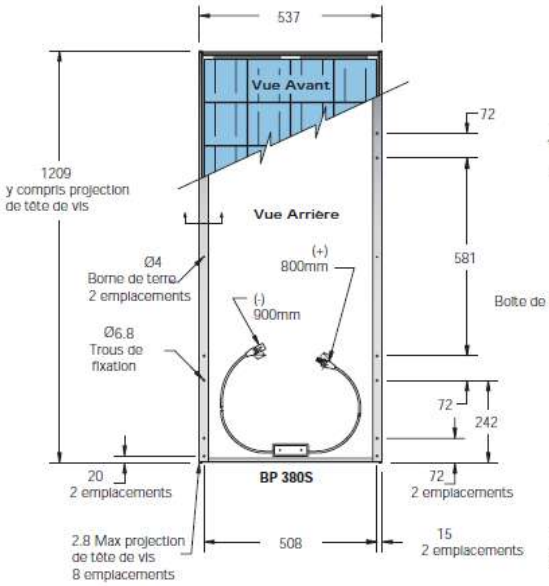


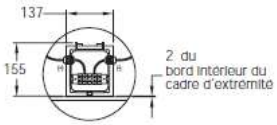
Module Photovoltaïque - 80 Watt

BP 380

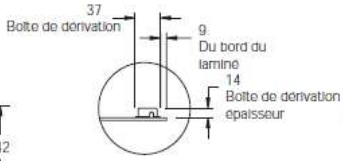
4017E-2 02/04

Plan du Module

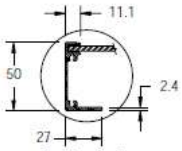




BP 380H
Vue du haut (Couvercle ouvert)



BP 380L
Vue de profil



Section A - A

Vis de terre auto foreuse, notice et garantie inclus avec chaque module.

Caractéristiques Électriques Typiques	BP 380
Puissance maxi (Pmax)	80W
Minimum garanti Pmax	76W
Tension à Pmax (Vmp)	17.6V
Courant à Pmax (Imp)	4.55A
Courant de court-circuit (Isc)	4.8A
Tension à circuit ouvert (Voc)	22.1V
Coefficient de température de Isc	(0.065±0.015)%/K
Coefficient de température de Voc	-(80±10)mV/K
Coefficient de température de la puissance	-(0.5±0.05)%/K
NOCT (Air 20°C; Ensoleillement 0.8kW/m2; vitesse de vent 1m/s)	47±2°C
Calibre maxi du fusible série	15A (BP 380S / BP 380L) / 20A (BP 380H)
Tension maxi du système	600V (régime nominal IEC 61215) 1000V (régime nominal TÜV Rheinland)

Conditions d'essai standard - irradiance de 1000W/m2 à un spectre solaire AM1.5G et une température de 25°C.

Caractéristiques mécaniques	BP 380S / BP 380H	BP 380L
Dimensions (mm) (Tolerances globales +/-3mm)	1209 x 537 x 50	1197 x 530 x 19
Poids (kg)	7.7	6.1
Cadre	Alliage d'aluminium anodisé clair type 6063T6. Cadre universel argent.	
Cellules solaires	36 cellules (125mm x 125mm) configurées géométriquement pour être branchées en série pour une matrice 4 x 9.	
Boîte de dérivation (BP 380H)	Boîte de dérivation IP54 avec bloc raccord de 6 bornes de fixation ; accepte PG 13.5, M20, 13mm conduit ou garniture de câble acceptant des câbles de diamètre de 6-12mm. Fils de 2.5-10mm2 (8 à 14 AWG).	
Câbles de sortie (BP 380S / BP 380L)	Câble RHW AWG# 12 (4mm2) connecteurs multicontact étanches polarisés en CC; longueur asymmétrique 900mm (-) et 800mm (+).	
Diodes	Deux diodes Schottky de dérivation 9A, 45V intégrées.	
Construction	Avant: verre trempé de 3mm à haute transmissivité. Arrière: Tedlar blanc; Agent d'encapsulation: EVA.	

Votre Distributeur BP Solar:

©BP Solar 2004

ANNEXE 2

ORGANIGRAMME DE PROGRAMME DE SIMULATION D UNE CELLULE PV

