

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU MAMMARI DE TIZI-OUZOU**



**FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE**

Mémoire de MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE

OPTION : Machines Electriques

Présenté par :

HELALI KAMELIA

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique
de l'UMMTO (Tizi-Ouzou)

Thème

Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque :
Etude Comparative

Soutenu publiquement le 25 / 06 / 2012 devant le jury composé de :

M^r Salah HADDAD	Professeur	UMMTO	Président
M^r Nacereddine BENAMROUCHE	Professeur	UMMTO	Rapporteur
M^r Mohand Amokrane HANDALA	Maître de Conférences A	UMMTO	Examineur
M^r M'hemed RACHEK	Maître de Conférences A	UMMTO	Examineur
M^r Mustapha BOUHERAOUA	Maître de Conférences B	UMMTO	Examineur

Remerciements

*Tout d'abord je tiens à remercier Monsieur **Nacer Eddine BENAMROUCHE** Professeur à l'université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour l'encadrement qu'il m'a assuré et ses précieux et judicieux conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de ce projet, sa confiance témoignée, sans oublier sa qualité humaine. Il trouve ici ma gratitude et ma reconnaissance profonde.*

*Par ailleurs, je tiens à exprimer mes vifs remerciements au président du jury Monsieur **Salah HADDAD**, Professeur à l'université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.*

*Je remercie sincèrement Monsieur **Mohand Amokrane HANDALA** Maître de Conférences A à l'université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Monsieur **M'hemed RACHEK** Maître de Conférences A à l'université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou et Monsieur **Mustapha BOUHERAOUA** Maître de Conférences B à l'université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou d'accepter de faire partie du Jury.*

*Mes remerciements vont également à Monsieur **ZAOUIA** Maître Assistant A à l'université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou et Mademoiselle **KACHENORA** Maître Assistante A à l'université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour leurs conseils scientifiques et leur disponibilité sans limite.*

Je tiens également à remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents, pour leur sacrifices, et qui n'ont jamais cessé de m'encourager que Dieu me les garde.

Mes très chères sœurs : Chahrazad et son mari Marzak, Hayate et Kahina.

Mes très chers frères : Nourddin, Hamza, Smaïl.

Ma grand-mère que dieu me le garde.

Tous mes amis (es) :

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : Notions essentielles sur le gisement solaire	
I-1 Introduction.....	3
I-2 Gisement solaire.....	3
I-2-1 Le spectre solaire.....	4
I-2-3 Gisement solaire au sol.....	5
I-2-4 Le rayonnement solaire.....	7
I-2-5 Dualité de la lumière.....	8
I-3 Coordonnées terrestres.....	9
I-3-1 Longitude.....	9
I-3-2 La latitude.....	10
I-3-2 L'altitude.....	10
I-4 Le mouvement de la terre et le mouvement du soleil et ses coordonnées.....	11
I-4-1 Mouvement de rotation.....	11
I-4-2 Mouvement de translation.....	11
I-4-3 La variation annuelle du rayonnement direct extraterrestre.....	12
I-5 Les coordonnées du soleil.....	12
I-5 -1 Coordonnées équatoriales.....	12
I-5 -1-1 Déclinaison solaire δ	13
I-5 -1-2 Angle horaire du soleil H.....	14
I-5 -2 Coordonnées horizontales.....	15
I-5 -2 -1 La hauteur du soleil (h).....	15
I-5 -2 -2 Azimut du soleil (a).....	16
I-6 Différents types de rayonnement.....	16
I-6-1 Rayonnement direct.....	16
I-6-2 Rayonnement diffus.....	19
I-6-3 L'albédo ou Réfléchi	20
I-6-4 Rayonnement global.....	20
I-7 Conclusion.....	21

Chapitre II : Energie solaire photovoltaïque

II-1 Introduction.....	22
II-2 Conversion d'énergie : les différentes technologies solaires.....	22
II-2-1 Solaire à concentration thermodynamique.....	23
II-2-2 Solaire thermique.....	23
II-2-3 Solaire Photovoltaïque.....	25
II-3 Les filières technologiques.....	25
II-3-1 Le silicium.....	27
II-3-1-1 Le silicium mono-cristallin.....	27
II-3-1-2 Le silicium multicristallin (Polycristallin).....	27
II-3-2 Les couches minces.....	28
II-3-3 Cellules organiques et plastiques.....	29
II-4 Le photovoltaïque.....	31
II-4-1 La cellule PV.....	31
II-4-2 L'effet photovoltaïque.....	32
II-4-2-1 Comportement de La jonction PN utilisée comme capteur PV.....	32
II-4-2-2 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	32
II-5 Générateur photovoltaïque (GPV).....	34
II-5-1 Constitution d'un module photovoltaïque	34
I-5-1-1 Mise en série.....	35
II-5-1-2 Mise en parallèle	36
II-6 Caractéristique électrique.....	38
II-6-1 Propriétés.....	38
II-6-2 zones de fonctionnement du module photovoltaïque.....	39
II-7 Paramètres photovoltaïques.....	40
II-7-1 Courant de court-circuit (I_{cc}).....	41
II-7-2 Tension de circuit ouvert (V_{co}).....	41
II-7-3 Facteur de forme, FF.....	42
II-7-4 Le rendement, η	43
II-7-5 Le rendement quantique, EQE.....	43
II-8 Protection classique d'un GPV.....	44
II-9 Fonctionnement à puissance maximale.....	45

II-10	Influence de la température et de l'éclairement.....	46
II-11	Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	48
II-11-1	Les avantages de l'énergie photovoltaïque.....	48
II-11-2	Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	48
II-12	Conclusion.....	49
Chapitre III : Modélisation des cellules photovoltaïques		
III-1	Introduction.....	50
III-2	Modélisation des cellules photovoltaïques.....	51
III-3	Modèles à deux diodes.....	53
III-3-1	Modèle à sept paramètres (2M7P).....	53
III-3-1-1	Caractéristiques courant-tension et puissance-tension de 2M7P.....	55
III-3-1-2	Simulation d'une cellule à 2M7P.....	57
III-3-2	Modèle à six paramètres (2M6P).....	58
III-3-2-1	Caractéristiques courant-tension et puissance-tension de 2M6P.....	58
III-3-3	Modèle à cinq paramètres (2M5P).....	59
III-3-3-1	Caractéristiques courant-tension et puissance-tension de 2M5.....	60
III-4	Modèles à une diode.....	61
III-4-1	Modèle à trois paramètres (L3P).....	61
III-4-1-1	Caractéristiques courant-tension et puissance-tension de L3P.....	62
III-4-2	Modèle à quatre paramètres (L4P).....	63
III-4-2-1	Caractéristiques courant-tension et puissance-tension de L4P.....	64
III-4-3	Modèle à cinq paramètres (L5P).....	64
III-4-3-1	Caractéristiques courant-tension et puissance-tension de L5P.....	65
III-5	Etude comparative.....	66
III-5-1	Influence de la résistance shunt.....	66
III-5-2	Influence de la résistance série.....	68
III-6	Conclusion.....	73

Chapitre IV : Évaluation de la puissance maximale produite par un générateur PV

IV-1 Introduction.....	74
IV-2 Calcul de la puissance maximale à la sortie du module PV.....	75
IV-2-1 Modèle de Borowy et Salameh (modèle 1).....	75
IV-2-2 Modèle de Jones et Underwood (modèle 2).....	77
IV-2-3 Modèle de Lu Lin (modèle 3).....	78
IV-2-4 Simulation du modèle quatre	79
IV-2-4-1 La puissance à l'entrée du champ photovoltaïque.....	79
IV-2-4-2 La puissance à la sortie du champ photovoltaïque.....	80
IV-3 Etude comparative.....	80
IV-4 Interprétation des résultats.....	82
IV-5 Conclusion.....	86
CONCLUSION GENERALE.....	87

Symbole	Unité	Définition
h	$J.s^{-1}$	Constante de Planck
ν	Hz	Fréquence de l'onde lumineuse
E	eV	Quantité d'énergie
c	$m.s^{-1}$	Vitesse de lumière
λ	m	Longueur d'onde
N	<i>jour</i>	numéro d'ordre du jour dans l'année $1 \leq N \leq 365$
λ_0 φ δ H a h γ β α i	<i>Degré</i> (°)	Longitude du lieu Latitude du lieu Déclinaison du soleil Angle horaire du soleil Azimut du soleil Hauteur du soleil La hauteur du capteur Angle d'inclinaison Azimut du capteur Angle d'incidence
I G D_h G_h	W/m^2	Rayonnement direct Rayonnement global Rayonnement diffus horizontal Rayonnement global horizontal
Alb		Albédo du sol
STC GPV MPP NOCT N N_s N_p		Conditions de Test Standard Générateur photovoltaïque Le point de puissance maximum Température nominale de fonctionnement de la cellule solaire Le nombre du module constituant le champ photovoltaïque Nombre des cellules en série Nombre des en parallèle

V_{pv}	V	La tension disponible en sortie du générateur PV
V_{co}		La tension à circuit ouvert
I_{pv}	A	Le courant disponible en sortie du générateur PV
I_{sh}		Courant de résistance de shunt
I_{mp}		Le courant maximum de point du fonctionnement du module Pv
I_{ph}		Courant photonique
$I_{ph,ref}$		Le courant photonique sous condition de référence
μ_{cc}	A/K	Coefficient de sensibilité de la tension à la température
μ_{co}	V/K	Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température
R_s	Ω	La résistance série
R_{sh}		La résistance shunt
T_c	K	Température absolue
K		La constante de Boltzmann
T_a		Température ambiante
$T_{c,ref}$		La température de cellules à la condition de référence
q	C	La constante de charge d'électron
G, G_{ref}	w/m^2	L'éclairement réels et la condition de référence La surface de module photovoltaïque
S	m^2	La surface de module photovoltaïque
FF		Facteur de forme
η		Le rendement des cellules
EQE		Le rendement quantique

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Par opposition, une énergie dite renouvelable doit se régénérer naturellement et indéfiniment à l'échelle temporelle de notre civilisation. Parmi ces énergies, l'énergie issue du soleil répond actuellement à ces critères à la fois d'abondance à la surface terrestre et de régénération infinie à notre échelle. Elle peut ainsi être utilisée directement sous forme thermique et depuis la découverte de l'effet photovoltaïque, convertie en énergie électrique. Cette dernière, bien qu'elle soit connue depuis de nombreuses années, comme source pouvant produire de l'énergie allant de quelques milliwatts au mégawatt, reste à un stade anecdotique et ne se développe pas encore dans de grandes proportions, notamment à cause du coût trop élevé des capteurs mis en œuvre [1].

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839. Cette conversion d'énergie peut s'effectuer par le biais d'un capteur constitué de matériaux sensibles à l'énergie contenue dans les photons. Ce capteur se présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule nommée cellule photovoltaïque (PV). La quantité d'énergie électrique ainsi générée peut varier en fonction du matériau utilisé, des paramètres géométriques du capteur et de sa capacité à collecter les électrons avant qu'ils ne se recombinent dans le matériau. L'association possible de plusieurs cellules PV en série/parallèle permet d'adapter théoriquement la production d'énergie photovoltaïque à la demande. Ces associations constituent un générateur photovoltaïque (GPV) avec des caractéristiques courant-tension $I(V)$ spécifiques, non-linéaires et présentant des points de puissance maximale (PPM) dépendant du niveau d'éclairement, de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [2, 5].

En effet, le développement des systèmes de conversion rentables et économiquement viables, passe nécessairement par la compréhension des différents composants du système à leur tête le panneau solaire. Ce dernier est composé de plusieurs cellules solaires qui

nécessitent étude et compréhension. Plusieurs modèles ont été présentés dans la littérature pour étudier le comportement d'une cellule solaire et déterminer ses caractéristiques en particulier la caractéristique courant- tension et la caractéristique puissance - tension. Ces modèles peuvent être classés en deux groupes : les modèles à deux diodes et les modèles à une diode. De plus, le point donnant la puissance maximale a suscité un intérêt supplémentaire car l'obtention de modèles simplifiés modélisant le comportement de la photovoltaïque en fonction des conditions climatiques (température, éclairement) s'avère nécessaire surtout lors de l'étape de dimensionnement. Quatre modèles établis dans la littérature ont été revus et leurs résultats comparés.

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur la modélisation d'une cellule photovoltaïque, étude comparative. 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 second chapitre, nous avons présenté les enjeux et les développements actuels des cellules photovoltaïques, le fonctionnement d'une cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque et l'influence des différents paramètres extérieurs. Nous avons présenté les différentes technologies des cellules actuellement sur le marché et en cours de développement. Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation des cellules photovoltaïques qui passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. De nombreux modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

Dans le quatrième chapitre, nous décrivons quelques modèles mathématiques permettant de calculer la puissance délivrée par le module solaire photovoltaïque. Nous avons ensuite réalisé une comparaison entre quatre modèles de puissance dans le but de déduire le modèle le plus pratique et le plus optimal.

On terminera notre travail par une conclusion générale.

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 kilowatt crête 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 [4].

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^2 dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m^2 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 surface 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 sous forme d'atlas et mettent en évidence des « gisements solaires » à la surface de la terre [5].

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 [7].

La figure I-1 présente la courbe d'énergie du corps noir à 6000K, le rayonnement solaire hors de 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.

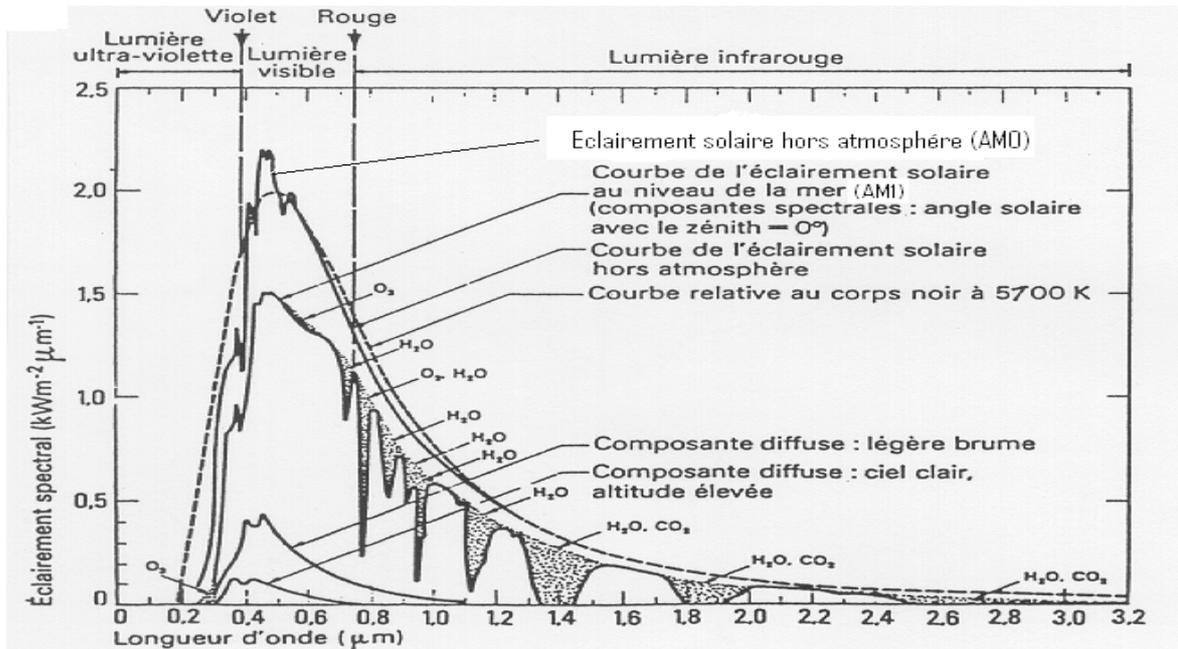


Figure I-1 : Eclairement solaire [1].

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_2 , H_2O ,.....). Les conditions 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 (AM_x) 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/cm^2 pour AM1.5 dont la surface est inclinée à 37° du soleil) et de plus, sert de standard pour quantifier les performances de nouveaux dispositifs photovoltaïques. Les conditions standards de caractérisation sont définies par les normes IEC-60904 de l'International Electrotechnical Commission (IEC) selon une distribution spectrale AM1.5 global (somme des rayonnements directs et diffus), d'intensité 100 mW/cm^2 et pour une température de cellule de 25°C [6,12].

Au sol, le rayonnement solaire a au moins deux composantes : une composante directe et une composante diffuse (rayonnement incident diffusé ou 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/cm^2 [8,9].

Sa valeur dépend de la pression, de l'altitude et de l'angle d'incidence des rayons lumineux. L'intégration de l'irradiance 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 [8]:

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

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

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

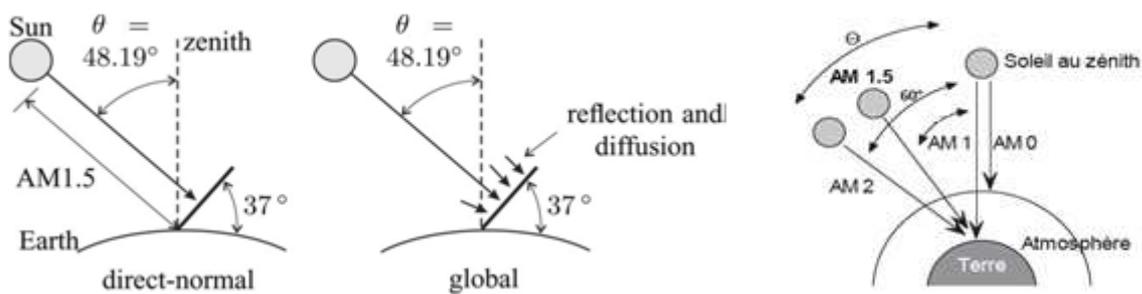


Figure I-2: Schéma indiquant le nombre d'air masse AM_x en fonction de la position géographique.

I-2-3 Gisement solaire au sol

Le gisement solaire au sol est très variable comme présenté sur la figure I-3. La mesure a été faite à l'université Paul Sabatier à Toulouse [10].

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/m^2 alors qu'elle est de 1000W/m^2 pour les jours ensoleillés. La présence de nuages modifie sensiblement l'importance des rayonnements du soleil, les nuages jouant un rôle de milieu diffusant [10].

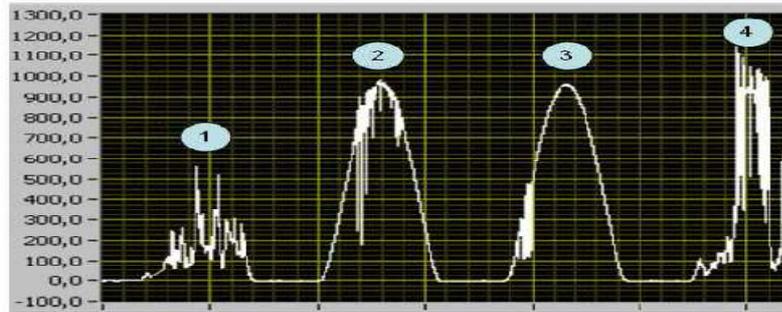


Figure I-3 : Irradiation globale (W/m^2) au sol à Toulouse du 11 juin au 14 juin 2009 (date proche du solstice d'été) [10].

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 [10].

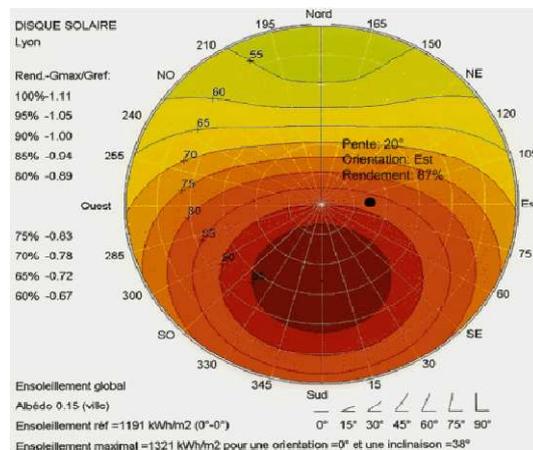


Figure I-4 : Disque Solaire pour la ville de Lyon [10].

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 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (Fig. I-5). Un bilan énergétique montre que, sur cette quantité d'éclairement qu'apporte le soleil au système terre+atmosphère, environ 100 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ sont réfléchis vers l'espace ; seul le reste est absorbé, pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface de la terre [6,11].

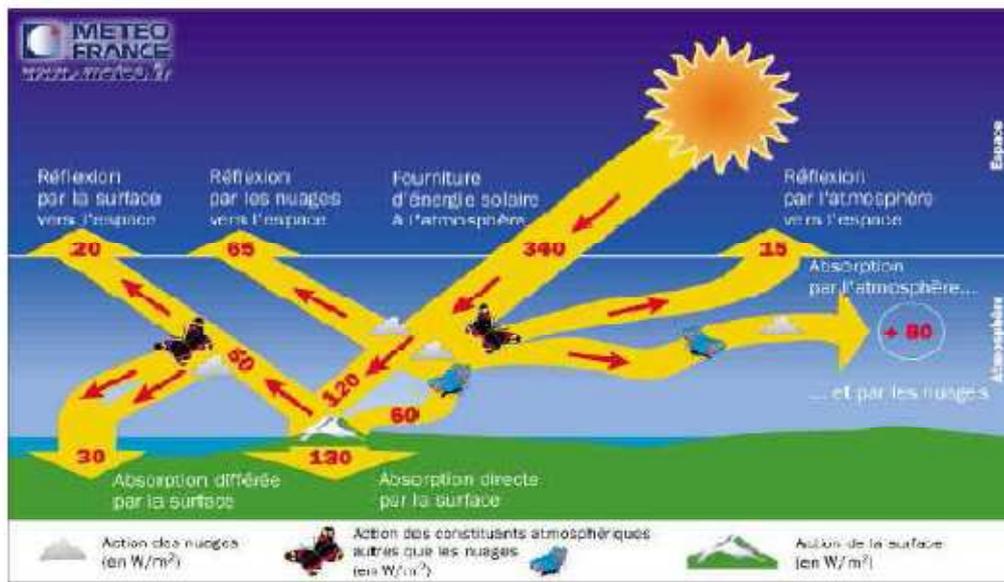


Figure I-5 : Rayonnement solaire transmis à la terre.

La figure I-5, 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 ($65 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), le reste ($15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) étant dû aux autres constituants atmosphériques comme les gaz et aérosols. Il reste donc $180 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ qui parviennent à la surface terrestre au terme d'une transmission dont les deux tiers ($120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) se font directement, le reste ($60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) s'effectuant par diffusion vers le bas.

Intervient alors un processus complexe d'interaction entre la diffusion vers le bas et la réflexion. Sur les 180 W.m^{-2} incidents, la surface terrestre, qui possède un albédo moyen élevé, devrait renvoyer dans l'atmosphère environ 50 W.m^{-2} . En fait, la majeure partie de l'éclairement qu'elle réfléchit ainsi lui revient tôt ou tard et s'ajoute partiellement aux $180-50 = 130 \text{ W.m}^{-2}$ 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 le bas. 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 [6].

I-2-5 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 [8]

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

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 $0,2 \mu\text{m}$ (*ultra-violet*) et $4 \mu\text{m}$ (*infra-rouge*) avec un maximum d'énergie pour $0,5 \mu\text{m}$. 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre $0,2 \mu\text{m}$ et $2,5 \mu\text{m}$. De $0,4 \mu\text{m}$ à $0,78 \mu\text{m}$, 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-1 donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux [22].

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-1 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 pôle Nord et le pôle Sud.

Tout point sur la terre est caractérisé par sa latitude et sa longitude. Ces deux grandeurs représentent les coordonnées géographiques de ce point ainsi que par son altitude, figure I-6.

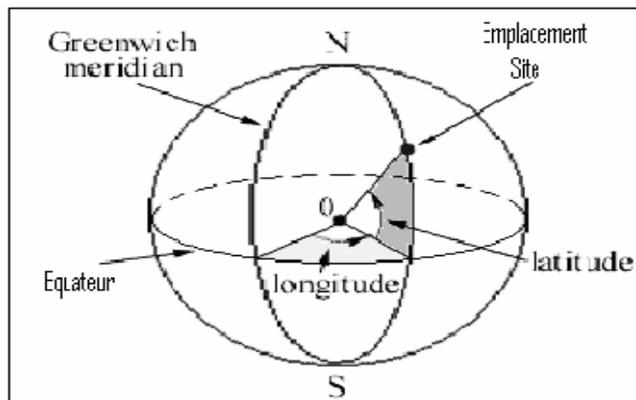


Figure I-6 : Coordonnées terrestre.

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 $+180^\circ$, 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 [13].

- Longitude OUEST $\lambda_0 < 0^\circ$
- Longitude EST $\lambda_0 > 0^\circ$

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 φ est comptée de 0° à $+90^\circ$ dans l'hémisphère nord [14].

La latitude a aussi un effet important : les journées estivales s'allongent à mesure qu'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-7 [15].

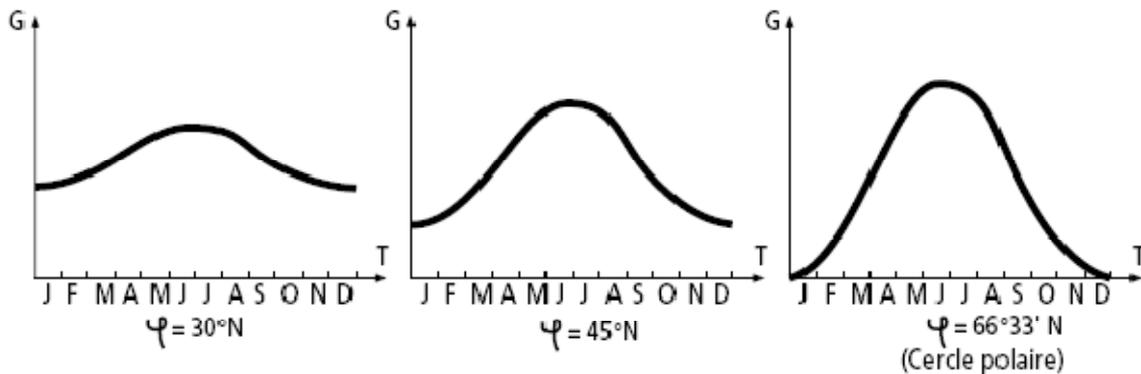


Figure I-7: Courbes d'ensoleillement typique par mois pour différentes latitudes.

I-3-2 L'altitude

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

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 $\pm 1.7\%$ par rapport à sa valeur moyenne qui est de $1.49675 \cdot 10^8 \text{ km}$. Cette distance est minimale au début de janvier et maximale au début de juillet [17].

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 heures. La rotation de la terre s'effectue avec une période de $Pr = 23h 56mn 04s \approx 24h$.

Sa vitesse linéaire de rotation à l'équateur est $Vr \approx 0,465 \text{ Km/s}$, 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 $23^\circ 27' \approx 23.45^\circ$ 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 $Pt = 365 \text{ jours } 5h 48mn 40s \approx 365.25 \text{ jours}$. 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 $1.49675 \cdot 10^8 \text{ km}$ (1 AU). Cette distance est minimale au début janvier et maximale au début de juillet, figure (I-8) [18].

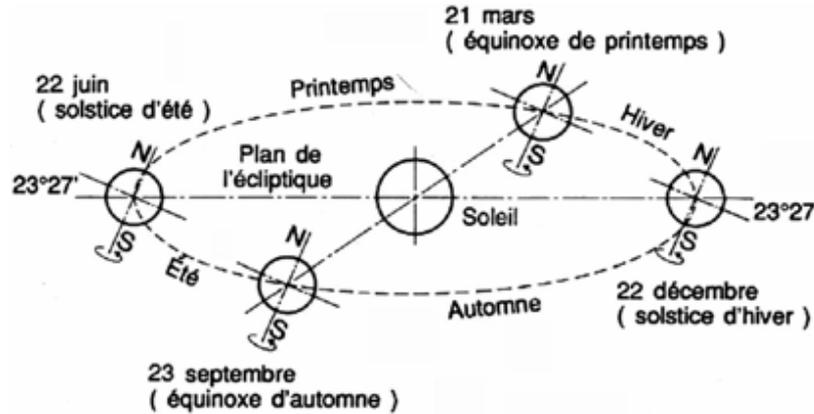


Figure I-8 : Le mouvement de la terre autour de soleil.

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

$$I_{on} = I_{sc} \cdot \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{366 \cdot N}{365} \right) \right) \quad (I-3)$$

Avec:

N : numéro d'ordre du jour dans l'année $1 \leq N \leq 365$;

I_{sc} : constante solaire, la valeur la plus probable actuellement retenue est 1367 W/m^2 ;

$E_0 = \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{366 \cdot N}{365} \right) \right)$: 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 (repère équatorial).
- 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 -1-1 Déclinaison solaire δ

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 $+90^\circ$ au pôle Nord), et négativement celle de l'hémisphère Sud (compris entre 0° à l'équateur et -90° au pôle Sud), et variée tout au long de l'année entre deux valeurs extrêmes $\pm 23.45^\circ$.

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].

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365}(J - 80)\right) \quad (\text{I-4})$$

Ou avec plus de précision :

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

Avec:

J : le numéro du jour de l'année compté à partir du 1^{er} janvier, c'est à dire il varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année.

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

La variation de la déclinaison du soleil au cours de l'année est représentée par la figure (I-9) [16].

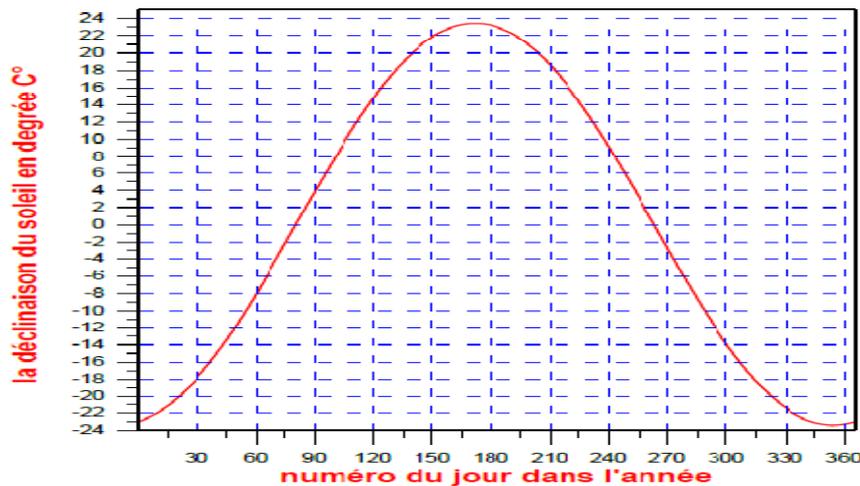


Figure I-9 : Variation annuelle de la déclinaison du soleil.

- $\delta = 0$ (Équinoxes): Les équinoxes représentent les deux dates de l'année où le soleil traverse le plan équatorial, l'équinoxe automnal, le 23 septembre, marquant le début de la chute de la durée de la journée, et l'équinoxe vernal le 21 mars, marquant le début de l'accroissement de la durée du jour.
- $\delta = 23,45^\circ$ (au Solstice été) : Le solstice d'été (au 21 juin), nous observons que le soleil est à son point le plus élevé dans le ciel. Elle marque le début de l'été dans l'hémisphère nordique.
- $\delta = -23,45^\circ$ (au Solstice hiver) : Il coïncide avec le 21 décembre.

I-5 -1-2 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

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

Avec

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

$$\Delta t = 9.87 \sin 2\left(\frac{360}{365} \cdot (J - 81)\right) - 7.35 \cos\left(\frac{360}{365} \cdot (J - 81)\right) - 1.5 \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (J - 81)\right) \quad (\text{I-8})$$

- 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 $+180^\circ$ [19].

On prend:

$H > 0$ après midi.

$H < 0$ le matin

$H = 0$ midi TSV.

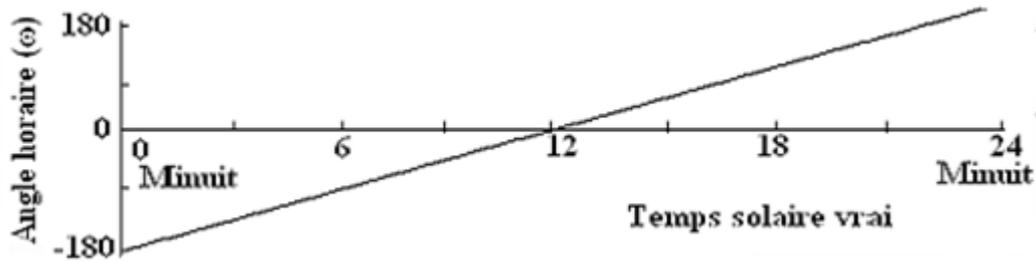


Figure I-10 : variation de l'angle horaire en fonction de temps solaire vrai.

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-11) [19].

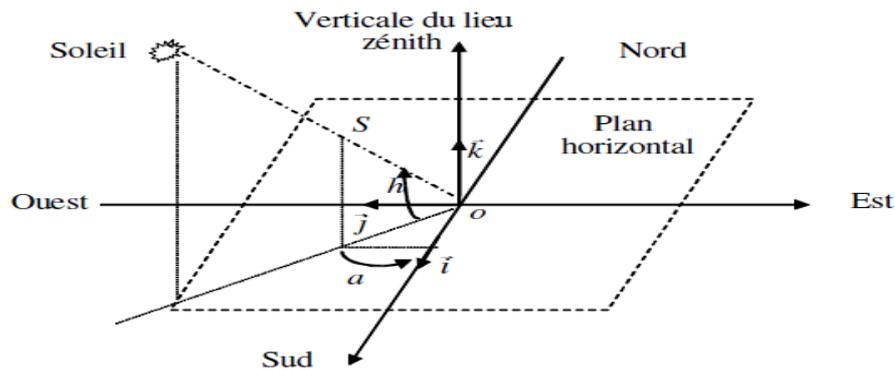


Figure I-11 : Repère horizontal.

I-5 -2 -1 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 :

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(H) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \quad (\text{I-10})$$

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 -2 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 :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(H)}{\cos(h)} \quad (\text{I-11})$$

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.

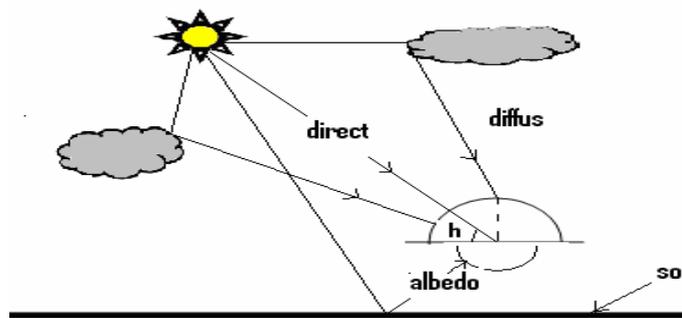


Figure I-11 : Différents composants de rayonnement.

I-6-1 Rayonnement direct

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

Le rayonnement direct reçu dans le plan du capteur est :

$$I_{(\alpha, \gamma)} = I \cdot \cos(i) \quad (\text{I-12})$$

Avec : I : rayonnement direct normal

i (Angle d'incidence) : c'est l'angle entre la direction du soleil et la normale au plan, Cet angle peut être déterminé par la connaissance des cosinus directeurs du rayon incident \vec{u} et la normale \vec{n} en coordonnées horizontales [16]:

$$\vec{n} \begin{cases} \cos(\gamma). \sin(\alpha) \\ \cos(\gamma). \cos(\alpha) \\ \sin(\gamma) \end{cases} \quad \vec{u} \begin{cases} \cos(h). \sin(a) \\ \cos(h). \cos(a) \\ \sin(h) \end{cases} \quad (\text{I-13})$$

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

$$\cos(i) = \vec{n} \cdot \vec{u} = \begin{pmatrix} \cos(\gamma). \sin(\alpha) \\ \cos(\gamma). \cos(\alpha) \\ \sin(\gamma) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(h). \sin(a) \\ \cos(h). \cos(a) \\ \sin(h) \end{pmatrix} \quad (\text{I-14})$$

$$\cos(i) = \cos(\alpha). \cos(\gamma). \sin(a). \cos(h) + \cos(\alpha). \cos(\gamma). \cos(a). \cos(h) + \sin(\gamma). \sin(h) \quad (\text{I-16})$$

$$\cos(i) = \cos(\alpha - a). \cos(\gamma). \cos(h) + \sin(\gamma). \sin(h) \quad (\text{I-17})$$

Cette équation peut être écrite d'une autre manière, à l'aide de l'équation des passages d'un système de coordonnées à un autre. On peut écrire l'angle d'incidence en coordonnées horaires, équation (I-18).

$$\begin{cases} \sin(h) = \cos(\gamma). \cos(H). \cos(\varphi) + \sin(\delta). \sin(\varphi) \\ \sin(a) = \frac{\cos(\gamma). \cos(H)}{\cos(h)} \end{cases} \quad (\text{I-18})$$

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

- Soleil à midi (azimut nul $a=0$) :

Pour un plan horizontal orienté sud ($\beta = 0 \Rightarrow \gamma = 90^\circ$, et $\alpha=0$) suivant la figure (I-12- a)

$$I_\alpha = I_0 = I. \sin(h) \quad (\text{I-19})$$

Pour un plan incliné sur l'horizontal et orienté sud (I-12-b).

On a:

$$\begin{cases} i = 90^\circ - (h + \alpha) \\ I_\alpha = I \cdot \cos(i) = I \cdot \sin(h + i) \end{cases} \quad (\text{I-20})$$

- Azimut quelconque : $a \neq 0$

Pour un plan vertical orienté sud ($\beta = 90^\circ \Rightarrow \gamma = 0^\circ$, et $\alpha = 0^\circ$), la figure (I-12-c).

On a:

$$I_\alpha = I \cdot \cos(h) \cdot \cos(a) \quad (\text{I-21})$$

Pour un plan incliné d'un angle α sur l'horizontal et orienté sud (I-12-d), I_α est la résultante de deux composantes projetées sur la normale au plan du capteur. L'une perpendiculaire à l'horizon : $I \cdot \sin h$, l'autre dans le plan de l'horizon, pointant vers le sud : $I \cdot \cos(h) \cdot \cos(a)$.

La somme des projections donne :

$$I_\alpha = I \cdot (\sin(h) \cdot \cos(\alpha) + \cos(h) \cdot \cos(a) \cdot \sin(\alpha)) \quad (\text{I-22})$$

Pour un plan vertical d'orientation quelconque γ dont la normale fait un angle γ avec le plan méridien (I-12-e).

On a:

$$\begin{cases} \alpha = 90^\circ \\ \text{et} \\ I_\alpha = I \cdot \cos(h) \cdot \cos(\gamma - a) \end{cases} \quad (\text{I-23})$$

Pour un plan incliné d'inclinaison quelconque α et d'orientation quelconque γ figure (I-12-f).

$$I_\alpha = I \cdot (\sin(h) \cdot \cos(\alpha) + \cos(h) \cdot \cos(\gamma - a) \cdot \sin(\alpha)) \quad (\text{I-24})$$

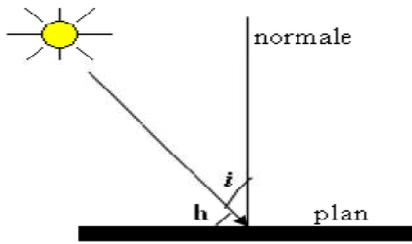


Figure (I-12-a)

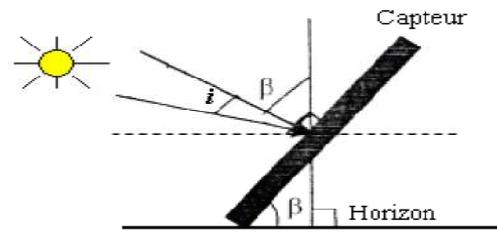


Figure (I-12-b)

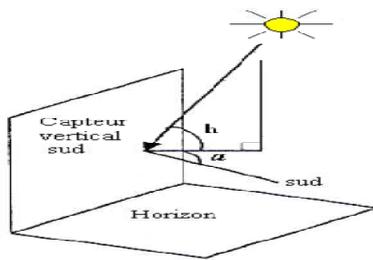


Figure (I-12-c)

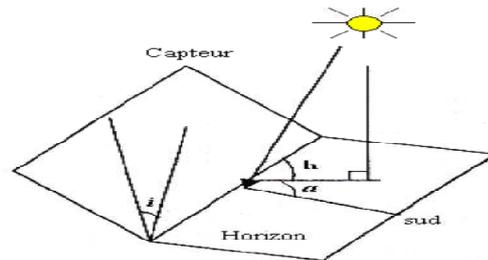


Figure (I-12-d)

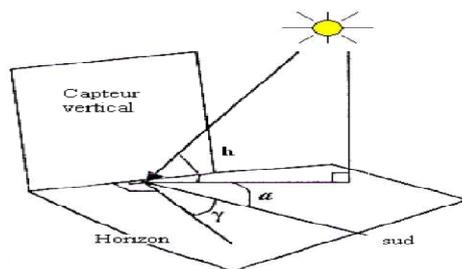


Figure (I-12-e)

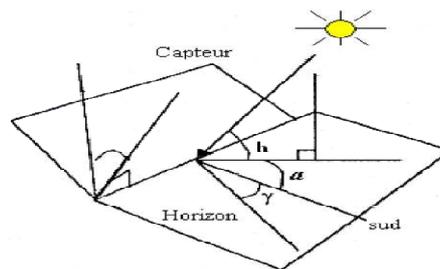


Figure (I-12-f)

Figure I-12 : Mesure le rayonnement sur une surface d'inclinaison quelconque [18].

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 [20].

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 [17].

Dans le plan du capteur le Rayonnement diffus est donné par [18]:

$$D_{(\alpha, \gamma)} = \left(\frac{1+\cos(\alpha)}{2}\right) \cdot D_h + Alb \left(\frac{1-\cos(\alpha)}{2}\right) \cdot G_h \quad (I-25)$$

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 $\Rightarrow D_v = 0.5 \cdot (H_h + \alpha \cdot G_h)$

I-6-3 L'albédo ou Réfléchi

C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi 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.

$$L'algédo (Alb) = \frac{\text{énergie refléchié}}{\text{énergie reçue}}$$

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 [20].

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

$$G = I \cdot \sin(h) + D_h \quad (\text{I-26})$$

Pour un plan quelconque, le rayonnement global est :

$$G_{(\alpha, \gamma)} = I_h \cdot \frac{\cos(i)}{\sin(h)} + \frac{D_h}{2} \cdot \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) \right] + \frac{D_h}{2} \cdot Alb \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) \right] \quad (\text{I-27})$$

Avec :

I_h : direct horizontal

La figure suivante présente les appareils de mesure pour les différents types de rayonnement :

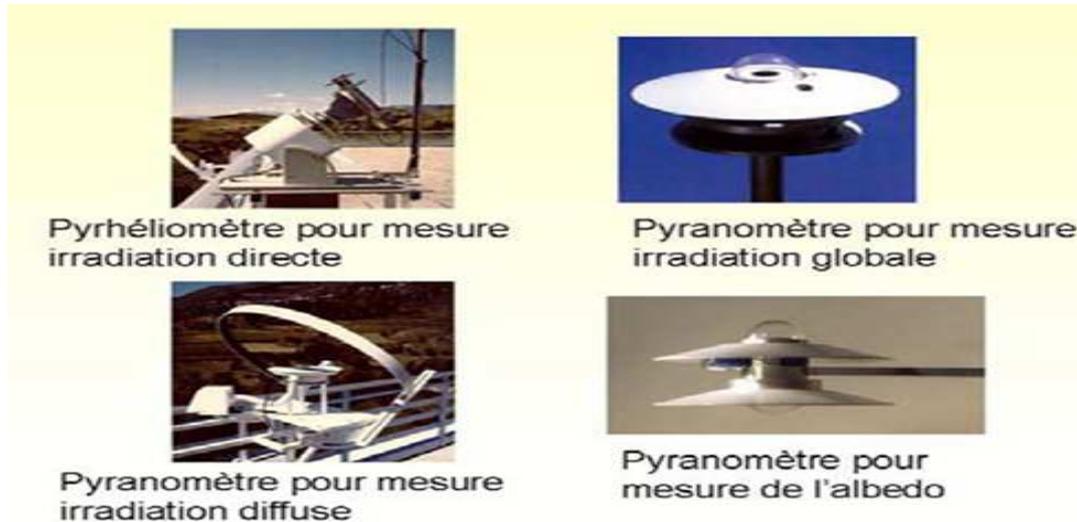


Figure I-13 : Appareils de mesure

I-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 importantes 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.

II-1 Introduction

L'énergie solaire est une source d'énergie accessible à tous (industriels, collectivités et particuliers). Grâce à celle-ci, il est possible de produire trois types d'énergies : l'énergie calorifique avec les installations solaires thermiques (chauffe-eau solaire ou climatiseur solaire), l'énergie électrique avec les installations solaires photovoltaïques et le solaire à concentration thermodynamique [21].

L'électricité photovoltaïque a dans un premier temps été développée pour des applications autonomes sans connexion à un réseau électrique pour par exemple des satellites de télécommunication ou pour des habitations isolées. On la trouve maintenant dans des applications de diverses puissances comme les calculatrices, les montres et d'autres objets d'utilisation courante. En effet, cette électricité produite par des cellules photovoltaïques individuelles peut alimenter diverses charges continues sans difficulté. Plus récemment, avec l'émergence d'installations photovoltaïques connectées au réseau de distribution, le photovoltaïque a connu un développement important en tant que moyen de production d'électricité.

Cette évolution constante a été rendue possible grâce aux recherches fondamentales menées dans le domaine des matériaux photovoltaïques, mais aussi par l'amélioration progressive des dispositifs de gestion de cette énergie menée en parallèle. En effet, l'électricité photovoltaïque est une source d'énergie intermittente, à caractère non-linéaire et dépendante de nombreux paramètres comme l'irradiance et la température. Il a donc fallu adapter cette source d'énergie à notre mode de consommation, soit en stockant la production solaire dans des batteries ou dans tout autre moyen de stockage en cours de développement, soit en la renvoyant sur le réseau électrique public [22].

II-2 Conversion d'énergie : les différentes technologies solaires

Il existe principalement trois façons d'utiliser directement l'énergie solaire : la thermodynamique, la thermique et le photovoltaïque.

II-2-1 Solaire à concentration thermodynamique

Le solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs qui concentrent l'énergie solaire vers un tube contenant un fluide caloporteur qui chauffe jusqu'à une température pouvant atteindre 500°C. La chaleur obtenue est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité. L'un des grands avantages de cette technologie provient du fait que la chaleur peut être stockée, permettant ainsi aux centrales solaires de produire de l'électricité pendant la nuit. La centrale ANDASOL 1, à Grenade, a ainsi une autonomie de 7 heures, mais des projets en cours ont comme objectif une autonomie de 20 heures [6].

Les miroirs qui collectent l'énergie solaire (placés à 3 ou 4 mètres du sol) forment une zone d'ombre sur le sol, cependant il arrive suffisamment de lumière pour cultiver des fruits ou des légumes. Une partie de l'eau douce formée sur place par condensation en sortie de turbine, peut être utilisée pour l'arrosage [6,13].



Capteurs thermodynamique cylindro-paraboliques



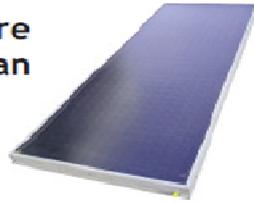
Capteurs thermodynamique paraboliques

Figure II-1 : Deux exemples de modules concentration thermodynamique.

II-2-2 Solaire thermique

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil, figure II-2. Cette forme de conversion d'énergie peut être directe si on veut uniquement chauffer de l'eau sanitaire. Par contre, si on veut générer de l'électricité, il faudra utiliser des générateurs qui convertissent l'énergie thermique générée en électricité (par exemple, moteurs à air chaud).

Capteur solaire thermique plan



Capteur solaire thermique



Figure II-2 : Deux exemples de modules thermiques

Le principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique est montré par la figure II-3. Pour commencer, le rayon solaire traverse une plaque de verre transparente ; le rayon lumineux sera alors absorbé après avoir passé la plaque de verre, par une plaque de métal noir qui absorbera environ 80 à 90% des rayons solaires. Puis, la chaleur ainsi générée est transmise à un circuit d'eau qui alimente un circuit secondaire qui, à son tour, alimente une habitation en eau sanitaire ou en chauffage.

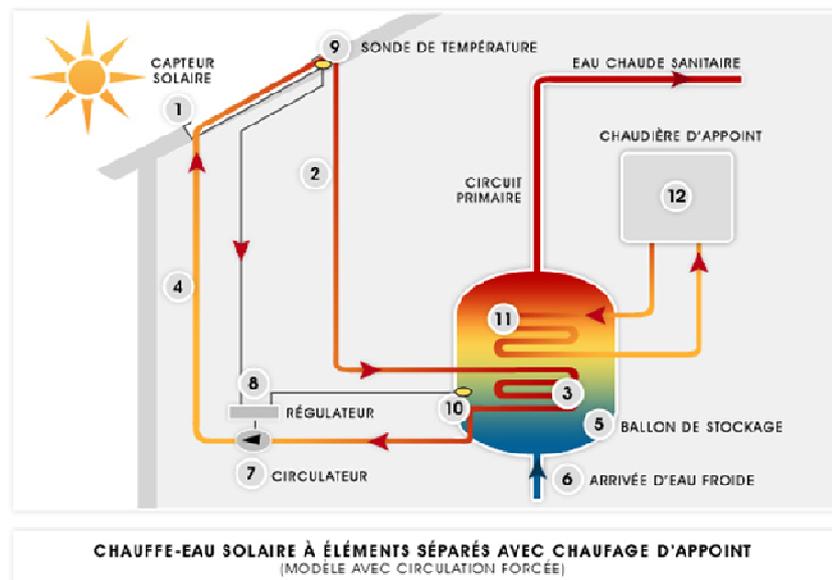


Figure II- 3: Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique.

La composition d'un panneau solaire thermique est montrée dans la figure II-4. Il est composé d'un corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant ; un système de refroidissement par le fluide caloporteur (transportant l'énergie) ; un isolant thermique situé sur les faces non exposées au rayonnement et une couverture transparente sur la face exposée, destinée à assurer l'effet de serre à l'intérieur du capteur.

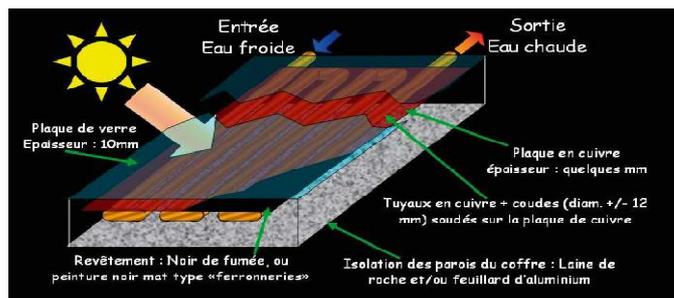


Figure II-4 : Composition d'un panneau solaire thermique.

L'énergie thermique utilise la chaleur du rayonnement solaire pour le chauffage de bâtiments ou de l'eau sanitaire. Pour cette dernière il est intéressant de savoir que dans certains pays le chauffage d'eau sanitaire représente environ 20% des dépenses énergétique d'un foyer et que l'énergie solaire thermique peut subvenir à environ 80% de cette dépense énergétique [23].

II-2-3 Solaire Photovoltaïque

Contrairement à l'énergie solaire thermique qui utilise le soleil comme source de chaleur, l'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface de la Terre. La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque). Cette transformation (effet photovoltaïque) est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible. L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839. Le mot « photovoltaïque » vient du mot « photo » (du grec « phos » qui signifie « lumière ») et du mot « Volt » (patronyme du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité) [6,23].

C'est dans la filière photovoltaïque que s'inscrit notre projet.

II-3 Les filières technologiques

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité, il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques. Ces filières se partagent inégalement le marché comme le montre la figure II-5.

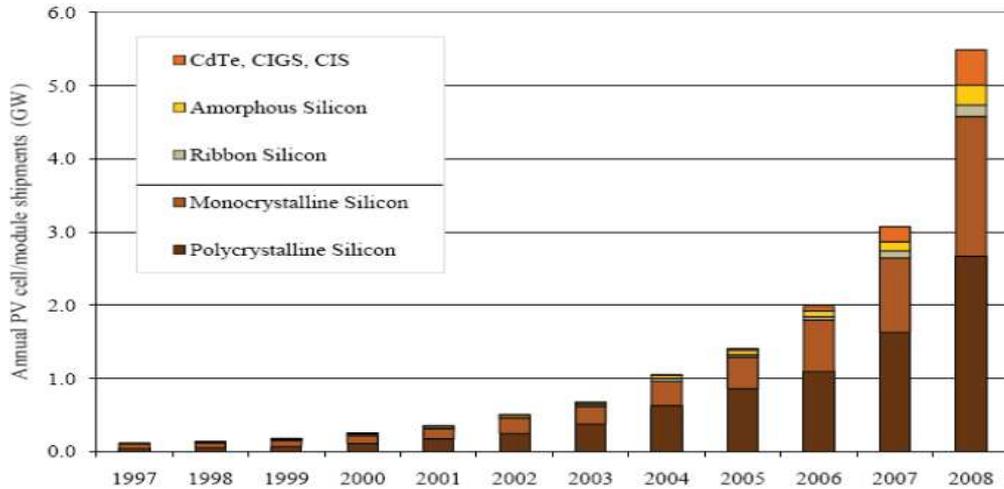


Figure II-5 : Evolution de la production mondiale des différentes technologies de cellules PV [3].

Ces technologies coexistent sur le marché dans des proportions équivalentes depuis de nombreuses années malgré des prix et des rendements très différents. L'augmentation des rendements focalise particulièrement l'intérêt des chercheurs.

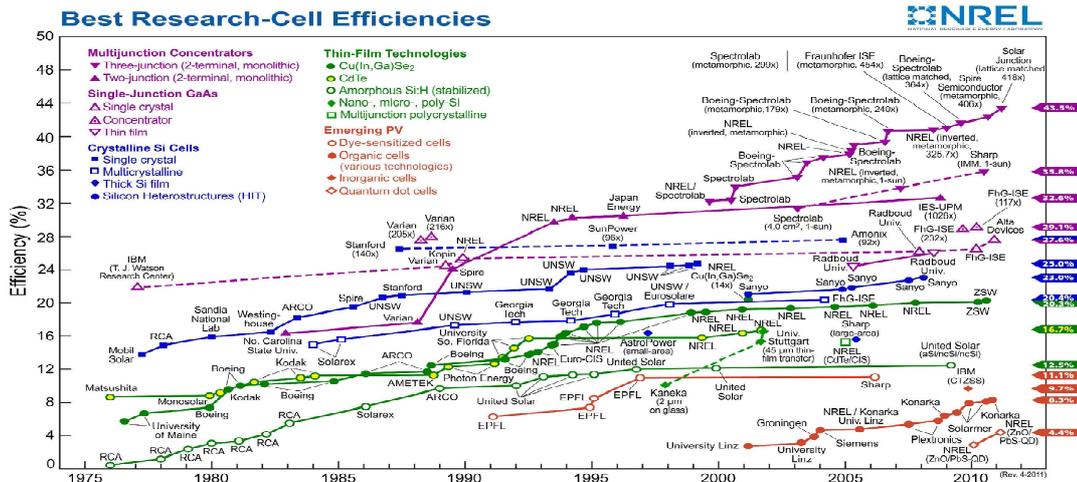


Figure II-6 : Evolution du rendement des différentes technologies.

Toutes les filières continuent de progresser de façon remarquablement continue depuis trente ans. Il n'y a pas eu de grandes ruptures dans cette progression et les nouvelles filières suivent sensiblement la même pente que les anciennes (Figure II-6). On a pu montrer que la limite théorique du rendement de la conversion énergétique se situe au-delà de 80% et n'est pas, a priori, hors d'atteinte. Les records en laboratoire le rappellent régulièrement, tel celui de 41,6% obtenu en 2008 aux USA [3].

II-3-1 Le silicium

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de part la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication. Cette filière comporte deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium multicristallin [3,24].

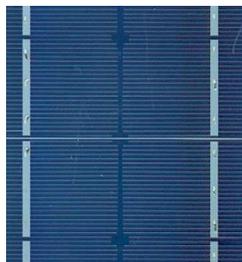
II-3-1-1 Le silicium mono-cristallin

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque.

Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multicristallin.

II-3-1-2 Le silicium multicristallin (Polycristallin)

Le silicium multicristallin (Polycristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. A elle seule elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène. Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles.



(a)



(b)

Figure II-7 : Photos de cellules monocristalline (a) et multicristalline (b).

II-3-2 Les couches minces

Le principal frein au développement du photovoltaïque à très grande échelle reste encore aujourd'hui, malgré la baisse de ces dernières années, le prix trop élevé du kWc. Le kilo watt crête (kWc) est l'unité qui définit la puissance d'un générateur PV aux Conditions de Test Standard (STC) ($1000\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ et 25°C). La majorité du prix d'un générateur photovoltaïque provient du silicium et du procédé de purification. Plusieurs types de cellules photovoltaïques visant à diminuer la quantité de matière nécessaire à leur fabrication sont aujourd'hui développés et commencent à être industrialisés. Ces technologies appelées couches minces font appel à des procédés de fabrication (dépôt sur ruban) visant la diminution de l'épaisseur des cellules.

La technologie à couche mince dont la plus mure est le silicium amorphe (Sia) représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial. L'avantage de cette technique est l'utilisation de substrats à bas coût.

Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre. De plus, il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples (Figure II-6) et ainsi de fabriquer des cellules souples. Son prix est plus faible que les cellules cristallines; en revanche, le rendement d'une cellule en Sia est inférieur à celui des cellules cristallines, il est d'environ 7%. L'utilisation de ce type de cellules nécessite l'utilisation d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau. Sans cette isolation galvanique les cellules amorphes se dégradent très rapidement. La raison physique de ce phénomène reste encore obscure. Les cellules amorphes captent très bien le rayonnement diffus et sont donc moins sensibles aux variations de rayonnement direct. Ces cellules sont donc une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères.

D'autres matériaux sont également utilisés dans les filières à couches minces comme le Tellure de Cadmium (CdTe), le disélénure de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS). Ces technologies possèdent de bons rendements, pouvant aller jusqu'à 19%. Malgré les potentialités de ces trois technologies, les problèmes de toxicité sur l'environnement et d'approvisionnement en matières premières qu'elles soulèvent les cloisonneront au laboratoire ou à des applications très spécifiques.



Module souple Unisolar (68Wc, 1,12 m²).



Module rigide Sharp (115Wc, 1.42 m²).

Figure II-8 : Deux exemples de modules utilisant le Sia (Silicium amorphe).

II-3-3 Cellules organiques et plastiques

Observé depuis 30 ans dans les matériaux semi-conducteurs organiques, l'effet photovoltaïque a connu cette dernière décennie un grand essor.

Initialement donnant des valeurs très faibles de rendement de conversion, cette application particulière des semi-conducteurs organiques commence à attirer l'attention en 1986 lorsque l'équipe de Tang [3] montre que les rendements proches du pourcent sont atteignables, conformément aux prédictions de Merritt en 1978. La cellule, composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint 0,95% de rendement de conversion [6]. Ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules « humides » et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules « plastiques ». Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures) [3].



Figure II-9 : Cellule solaire tout organique sur substrat souple.

L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent l'avantage de pouvoir être déposées en grande surface, à grande vitesse, par des techniques d'impression classiques. Elles ouvrent également la voie aux applications légères, nomades et souples. Enfin, grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes [24].

Le tableau ci-dessous donne le comparatif des rendements des différents types de cellules.

Type	cellule (labo)	Module (labo)	Module (commercial)	Niveau développement
1ère génération				
Silicium monocristallin	24,70%	22,70%	12-20%	Production industrielle
Silicium polycristallin	20,30%	16,20%	11-15%	Production industrielle
2e génération				
Silicium amorphe	13,40%	10,40%	5-9%	Production industrielle
Silicium cristallin en couche mince		9,40%	7%	Production industrielle
CIS	19,30%	13,50%	9-11 %	Production industrielle
CdTe	16,70%		6-9%	Prêt pour la production
3e génération				
Cellule organique	5,70%			Au stade de la recherche
Cellule de Grätzel	11%	8,40%		Au stade de la recherche
Cellules multi-jonctions	39%	25-30%		Au stade de la recherche, production exclusivement applications spatiales

Tableau II-1 : Comparatif des rendements des différents types de cellules [6].

II-4 Le photovoltaïque

II-4-1 La cellule PV

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

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

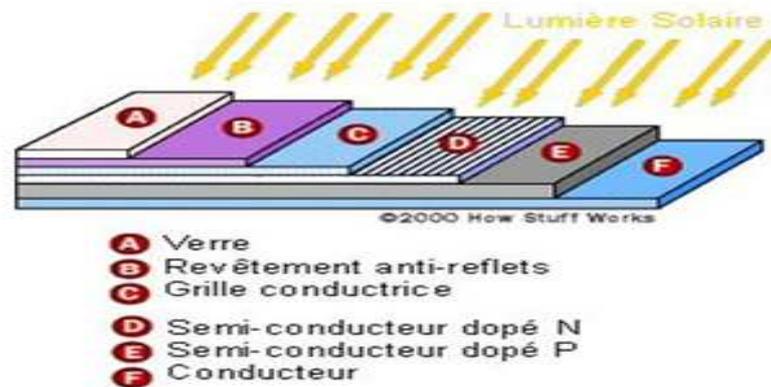


Figure II-10 : Structure basique d'une cellule solaire.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [2].

II-4-2 L'effet photovoltaïque

II-4-2-1 Comportement de La jonction PN utilisée comme capteur PV

En polarisant électriquement une jonction PN et en la soumettant à un éclairement solaire, on obtient les caractéristiques semblables à celles représentées par la figure II-11. Sans éclairement, le comportement d'une cellule PV est semblable à celui d'une mauvaise diode. Ainsi, sous polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et le courant de porteurs peut se développer. Sous polarisation inverse, seul un courant de porteurs minoritaires (courant de saturation) circule. Ce dernier varie peu avec la tension appliquée tant que cette tension est inférieure à la tension de claquage. Ces courants, directs ou inverses, comme pour des jonctions classiques, sont sensibles à la température de jonction.

Si cette jonction PN est soumise au rayonnement solaire, alors des paires électrons-trous supplémentaires sont créées dans le matériau en fonction du flux lumineux. Ce phénomène, aussi appelé effet photovoltaïque, ne se produit que si l'énergie des photons est supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite du matériau E_g . La différence de potentiel qui en résulte aux bornes de la structure caractérise l'effet photovoltaïque et se situe, selon les matériaux et la structure de la jonction [1].

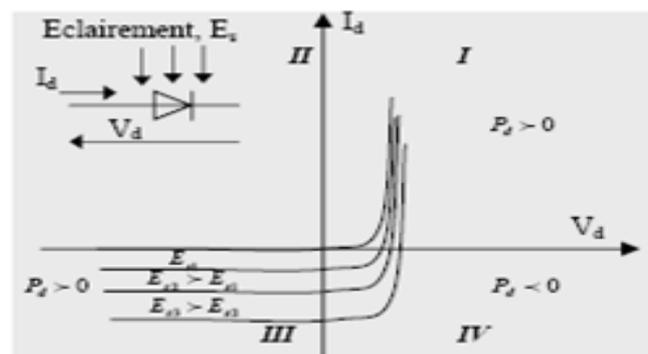


Figure II-11 : Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éclairagements (E).

II-4-2-2 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif;

- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteurs;
- collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure II-12.

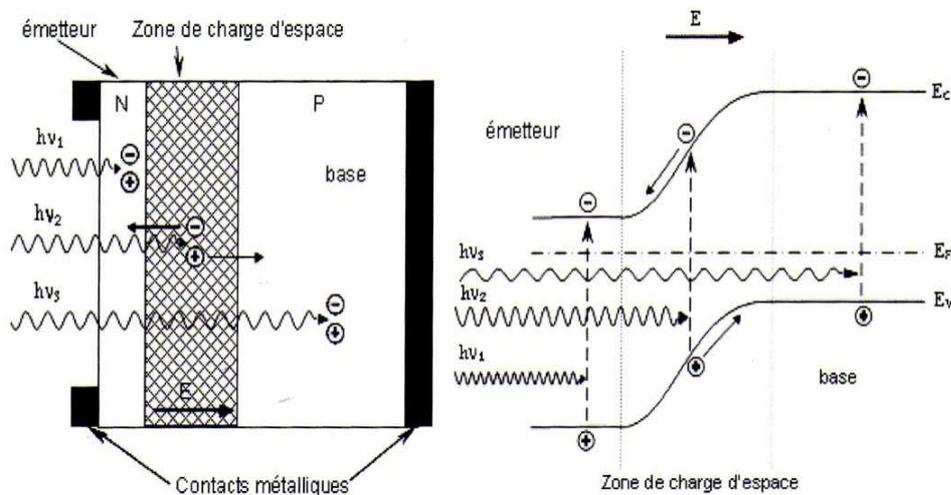


Figure II-12 : Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées.

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un photocourant de diffusion

- dans la zone de charge d'espace, les paires électron/ trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. On aura un photocourant de génération [25].

II-5 Générateur photovoltaïque (GPV)

II-5-1 La constitution d'un module photovoltaïque

- câblage des cellules photovoltaïques : les cellules sont connectées entre elles par un fins ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+)

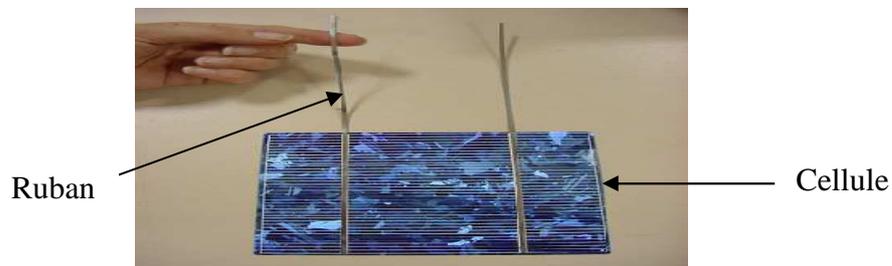


Figure II-13 : Ruban métallique d'une cellule.

- les cellules sont encapsulées sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents (EVA : Ethylène Acétate de Vinyle)
- le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation
- un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière
- la face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR

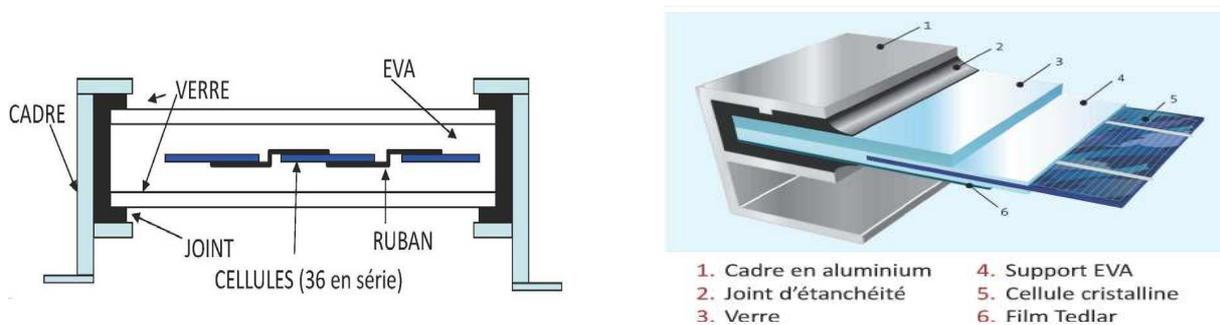


Figure II-14 : Encapsulation des cellules.

- connexion ; la boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass
- les 2 câbles unipolaires sont raccordés

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes N_p en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv} \quad (\text{II-1})$$

Avec :

P_{pv} : la puissance disponible en sortie du GPV

V_{pv} : la tension à la sortie du GPV

I_{pv} : le courant de sortie du GPV

II-5-2-1 Mise en série

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, figure II-15. L'équation (II-2) résume les caractéristiques électriques d'une association série de ns cellules.

$$V_{co} = N_s \cdot V_{co} \quad (\text{II-2})$$

Avec :

V_{co} : la tension du circuit ouvert

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible.

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ($V_{cons}=0.6V*36=21.6V$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau V_{op} proche de celle d'une tension de batterie de 12V [22].

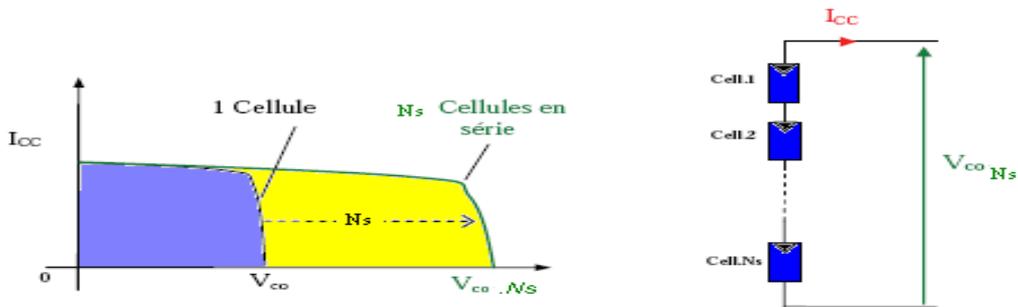


Figure II-15 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série.

II-5-2-2 Mise en parallèle

D'autre part, une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, Figure II-16. L'équation (II-3) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules.

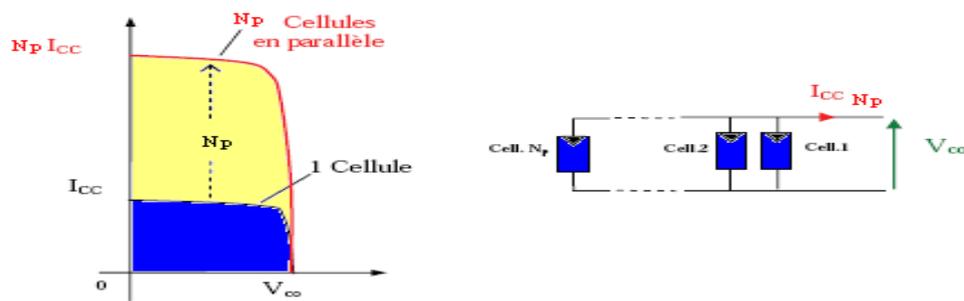


Figure II-16. Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.

$$I_{cc} = N_p \cdot I_{cc} \tag{II-3}$$

Avec

I_{cc} : le courant de court circuit

Si l'on désire avoir un générateur PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associer en parallèle plusieurs modules PV de caractéristiques similaires. Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les (N_s , N_p) cellules se comportent toutes de façon identique. Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison).

La puissance du générateur PV sera optimale si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale notée P_{max} . Cette puissance est le maximum d'une caractéristique $P(V)$ du générateur, et correspond au produit d'une tension optimale notée V_{op} et d'un courant optimal noté I_{op} .

Pour réduire les dysfonctionnements, les fabricants ont choisi de ne pas commercialiser des cellules PV seules. Ainsi, les générateurs PV se trouvent souvent sous forme de modules pré-câblés, constitués de plusieurs cellules, aussi appelés par abus de langage panneaux PV. Chaque référence de module a ses propres caractéristiques électriques garanties à $\pm 10\%$ selon le lot de fabrication [1].

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.

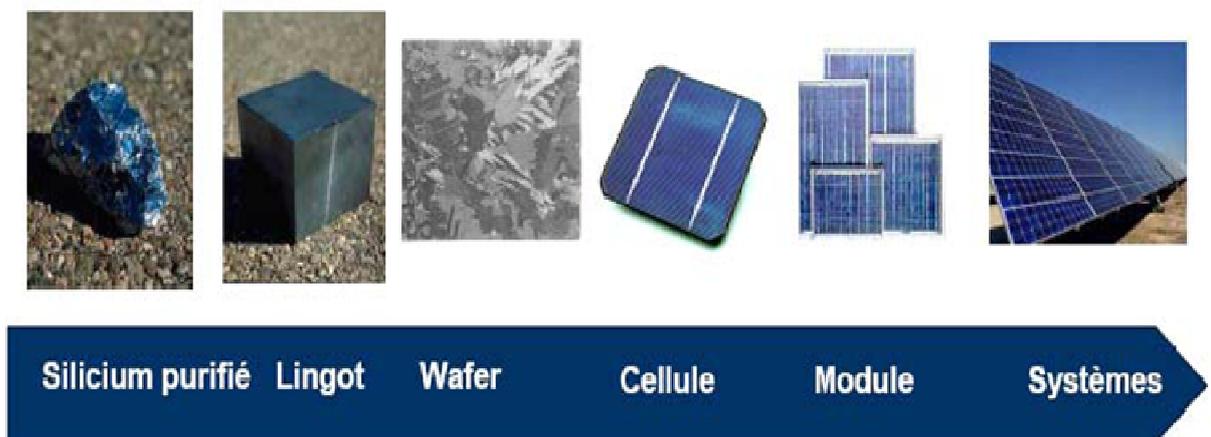


Figure II- 17 : Le passage d'une cellule à un champ photovoltaïque.

II-6 Caractéristique électrique

II-6-1 Propriétés

La cellule photovoltaïque possède une caractéristique $I(V)$ non linéaire (Figure II-18). La caractéristique d'une cellule photovoltaïque balaie 3 quadrants sur les 4 existants [26].

Une cellule PV est un récepteur dans le quadrant 2 et dans le quadrant 4. Le fonctionnement dans ces deux quadrants est à proscrire car un risque de destruction par phénomène d'échauffement local (hot spot) est possible. Le fonctionnement dans le quadrant 1 est le fonctionnement normal, en effet dans ce cas la cellule est un générateur, elle produit donc de l'énergie. L'objectif est donc de faire travailler la cellule dans ce quadrant.

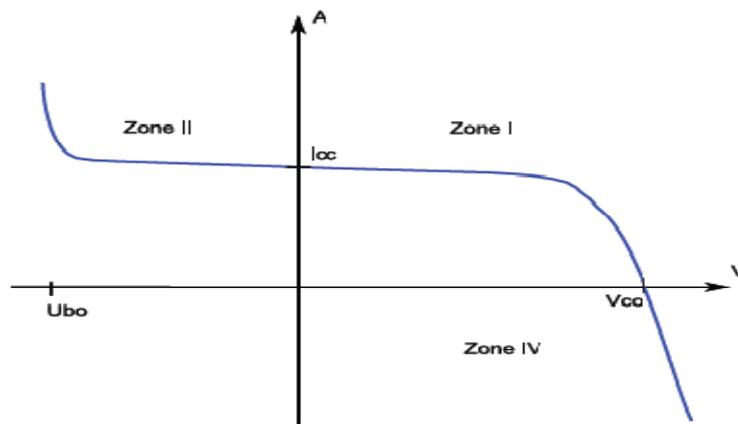


Figure II-18 : Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.

La tension en circuit ouvert (V_{co}) d'une cellule PV est comprise entre 0,3V et 0,7V selon le matériau utilisé, la température et son état de vieillissement. Son courant de court-circuit (I_{cc}) varie principalement selon le niveau d'éclairement et selon les technologies et les tailles de cellules (entre 5 et 8A pour le silicium cristallin). Une cellule PV peut être modélisée par les schémas présentés sur la figure II-19.

La Figure II-19a modélise la cellule PV dans les 1^{er} et 4^{ème} quadrants. Pour simuler la caractéristique de la cellule dans le 2^{ème} quadrant une quatrième branche est rajoutée en parallèle (Figure II-19b). Cette branche est constituée d'un générateur de tension U_{bo} (U_{bo} tension d'avalanche) et d'une diode mise en série. Elle simule le fonctionnement de la cellule PV lorsqu'elle est polarisée en inverse [3].

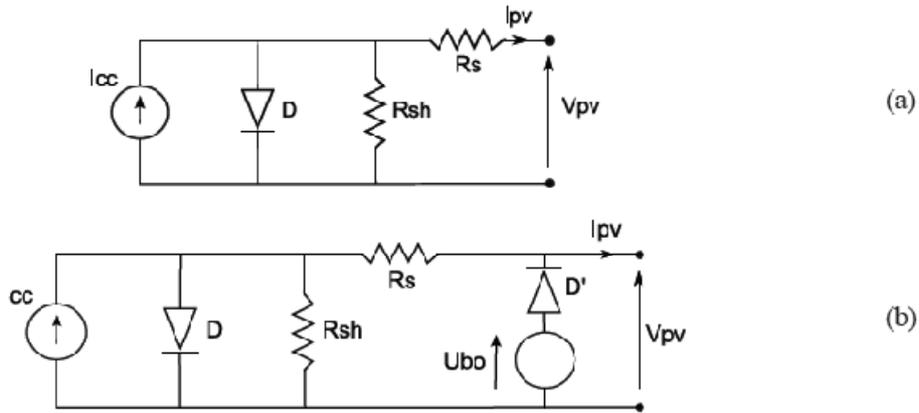


Figure II-19 : Circuit équivalent complet d'une cellule PV.

II-6-2 Zones de fonctionnement du module photovoltaïque

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'éclairement et, de façon générale, des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée. Nous rappelons brièvement dans ce paragraphe le comportement du générateur soumis à diverses contraintes. Ces notions sont en effet nécessaires pour comprendre le comportement d'un générateur PV et ensuite effectuer des optimisations de fonctionnement.

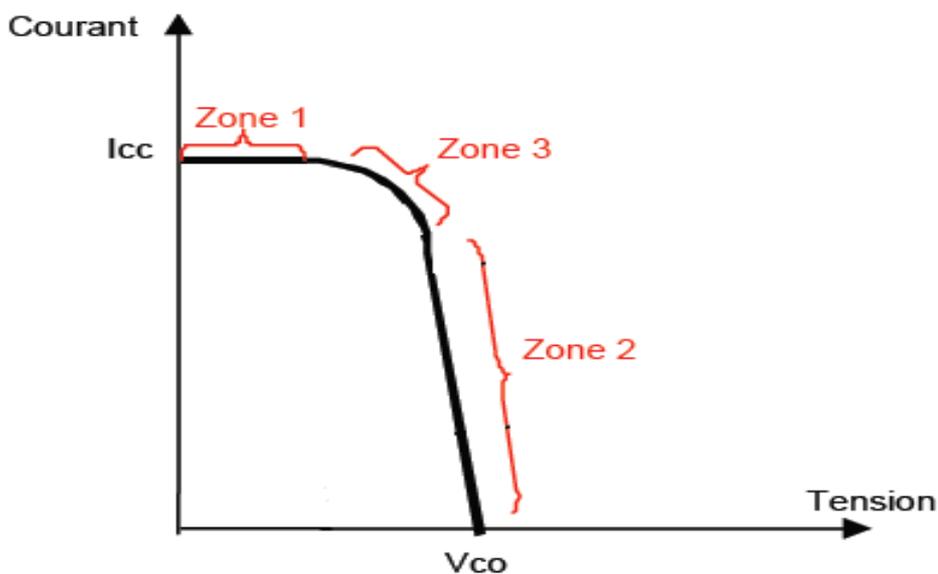


Figure II-20 : Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$.

La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes).

Nous pouvons décomposer la caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque en 3 zones :

- Une zone assimilable à un générateur de courant I_{CC} proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par $1/R_{sh}$ (Zone 1),
- Une zone assimilable à un générateur de tension V_{co} d'impédance interne équivalente à la résistance série R_s (Zone 2),
- Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_s à R_{sh} (zone 3). C'est dans la zone 3 qu'est situé le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. Ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par le couple (I_{max}, V_{max}) , et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions considérées [1].

II-7 Paramètres photovoltaïques

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $I(V)$.

La figure II-21 représente une caractéristique courant-tension $I(V)$ dans le noir et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF) du composant.

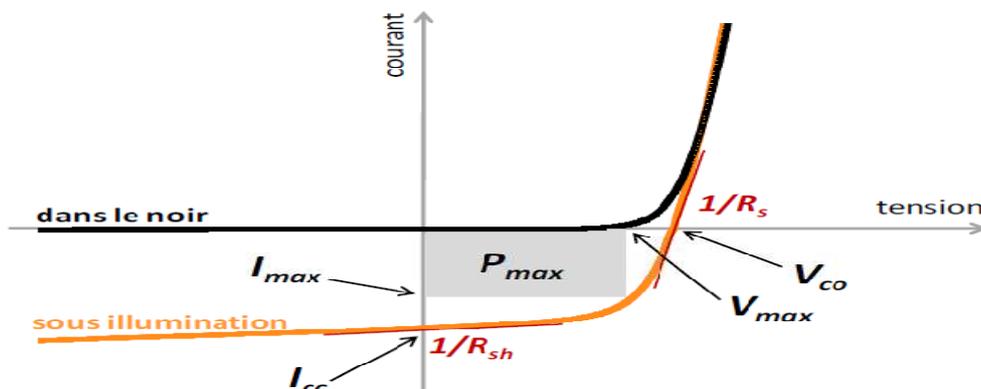


Figure II-21 : Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.

II-7-1 Courant de court-circuit (I_{cc})

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule, de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

II-7-2 Tension de circuit ouvert (V_{co})

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule [7].

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{II-4})$$

Avec :

$\frac{KT_c}{q}$: représentant le potentiel thermodynamique

T_c : est la température absolue

q : la constante de charge d'électron, $1.602 \cdot 10^{-23} \text{C}$

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

I_{ph} : le courant photonique

I_s : le courant de saturation

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement figure II-18.

- Régime des faibles flux lumineux : dans ce cas, $I_{ph} \ll I_s$, ce qui permet d'écrire :

$$\log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) = \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{II-5})$$

D'où :

$$V_{co} \approx \frac{K \cdot T_c}{q} \cdot \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{II-6})$$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule. La formule précédente peut s'écrire aussi $V_{co} = R_0 \cdot I_{ph}$, en posant $R_0 = \frac{K \cdot T_c}{q \cdot I_s}$: R_0 est la résistance interne de la diode en polarisation externe nulle (circuit ouvert) et sous faible flux lumineux.

- Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que $I_{ph} \gg I_s$, soit :

$$\frac{I_{ph}}{I_s} \gg 1 \quad (\text{II-7})$$

D'où :

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{II-8})$$

C'est le domaine du comportement logarithmique.

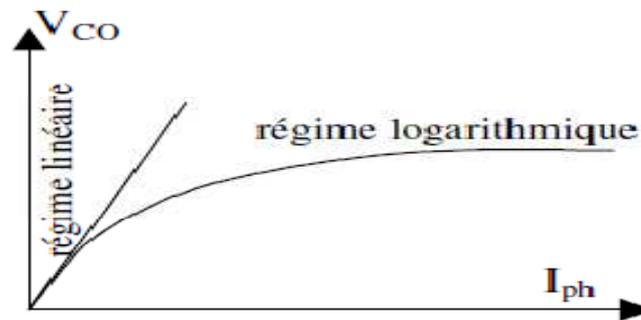


Figure II-22 : différents régimes selon la puissance d'éclairement.

Il est important de remarquer que cette tension augmente avec le log de I_{ph} , donc avec le log de l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme $\frac{KT_c}{q}$. En effet, le courant de saturation, I_s dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction : il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme $\frac{KT_c}{q}$. Donc la tension de circuit ouvert V_{co} baisse avec la température, ce qui est important dans le dimensionnement des systèmes [13].

II-7-3 Facteur de forme, FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [22]. Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{II-9})$$

II-7-4 Le rendement, η

Le rendement, η des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (\text{II-10})$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

II-7-5 Le rendement quantique, EQE

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Lorsque les photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons perdus par transmission à travers toute l'épaisseur de la cellule (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur s'appelle alors le rendement quantique interne, IQE (internal quantum efficiency). Dans le cas contraire, ce paramètre s'appelle le rendement quantique externe, EQE (external quantum efficiency). Le rendement quantique externe est défini comme suit:

$$EQE(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \cdot \frac{E(\lambda)}{e} = \frac{I_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \cdot \frac{h \cdot c}{e \cdot \lambda} \quad (\text{II-11})$$

Où $\varphi(\lambda)$ est le flux lumineux incident, e la charge de l'électron et E l'énergie du photon (avec $E(\lambda) = hc/\lambda$, h étant la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde).

Le rapport $I_{cc}(\lambda)/\varphi(\lambda)$ est appelé « réponse spectrale » de la cellule, elle est notée $SR(\lambda)$. Elle représente la sensibilité de la cellule pour chaque longueur d'onde. On peut donc redéfinir le rendement quantique externe comme suit [7], [27]:

$$EQE(\lambda) = SR(\lambda) \cdot \frac{h \cdot c}{e \cdot \lambda} \quad (\text{II-12})$$

L'EQE est aussi désigné sous le terme d'IPCE (de l'expression anglaise Incident Photon to Current Efficiency). En remplaçant les trois constantes par leurs valeurs numériques, on obtient

$$IPCE(\lambda) = 1.24 \frac{I_{cc}}{\varphi(\lambda) \cdot \lambda} \quad (\text{II-13})$$

II-8 Protection classique d'un GPV

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et en panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles, figure II-23.

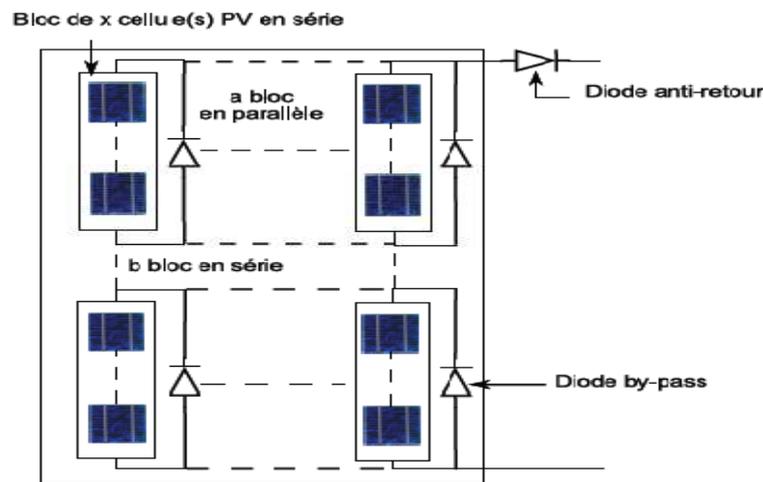


Figure II-23 : Schéma d'un module photovoltaïque

La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.

Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées.

La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, comme illustré sur la figure II-24, par la perte d'une partie de la protection d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance [29].

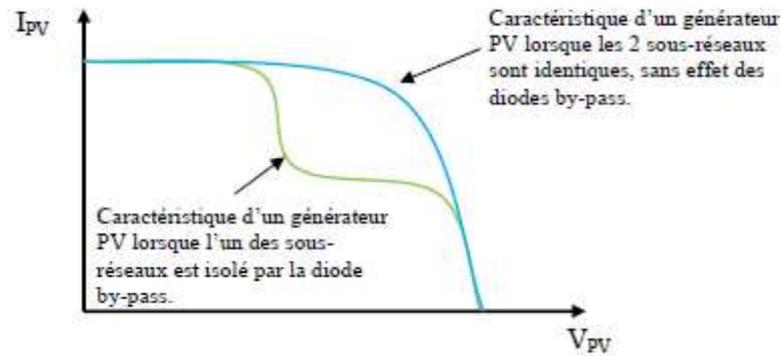


Figure II-24 : Effet de la diode by-pass sur la caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque.

II-9 Fonctionnement à puissance maximale

La caractéristique électrique $p(V)$ de ce type de GPV s'avère proche de celle d'une cellule PV aux rapports de proportionnalités près. Ces rapports dépendent du nombre de cellules connectées en série et du nombre de branches de cellules associées en parallèle. Cette caractéristique est également non linéaire et présente un point de puissance maximal (PPM) caractérisé par un courant et une tension nommés respectivement, comme pour la cellule, I_{max} et V_{max} . Sur la figure II-25, nous pouvons observer l'évolution du PPM d'un module commercial typique de 80W crêtes constitué de 36 cellules monocristallines en série, en fonction de la température et de l'éclairement.

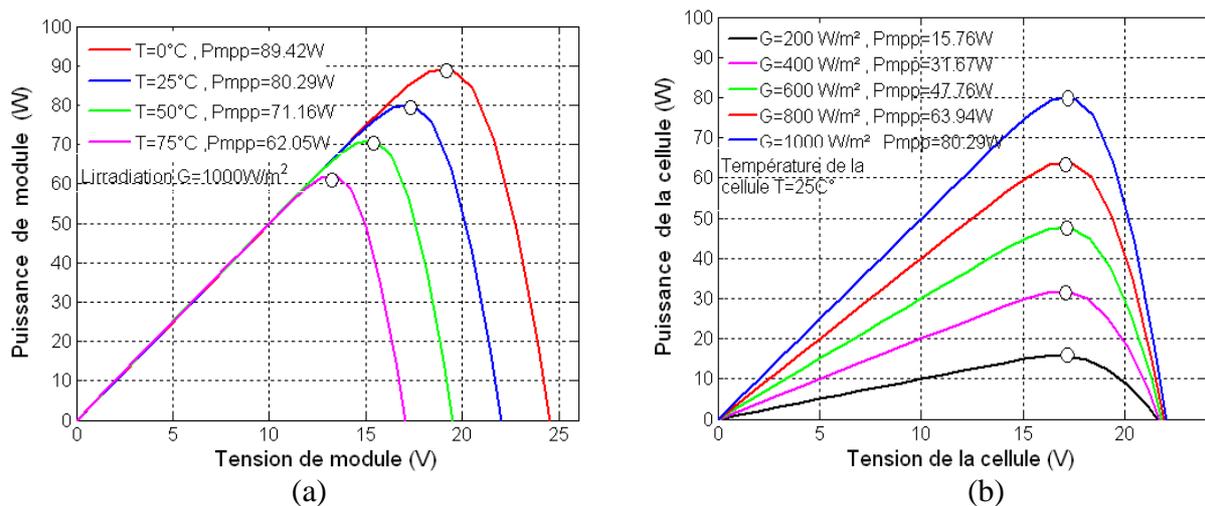


Figure II-25 : Evolution du PPM d'un module photovoltaïque d'une puissance crête de 80W en fonction de la température (a) et de l'éclairement (b).

Dans un système électrique comprenant une source et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation représente ce qui est le plus important. Dans le cas du photovoltaïque, cette démarche est plus complexe du fait que la caractéristique des cellules dépend fortement de l'ensoleillement et de la température ambiante, entre autres. Il faut trouver un dispositif permettant de fonctionner à tout moment suivant le point de fonctionnement optimal. Différentes méthodes de maximisation de puissance classées en deux catégories : les méthodes indirectes, utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum et les méthodes directes, sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturb & Observ (P&O), l'incrément de conductance.

II-10 Influence de la température et de l'éclairement

La caractéristique d'une cellule PV (ou d'un générateur PV) est directement dépendante de l'éclairement et de la température.

Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température maintenue constante 25°C, figure II-26, montrent clairement l'existence de maxima sur les courbes de puissance correspondant aux Points de Puissance Maximale P_{max} . Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert V_{co} (à vide) varie très peu.

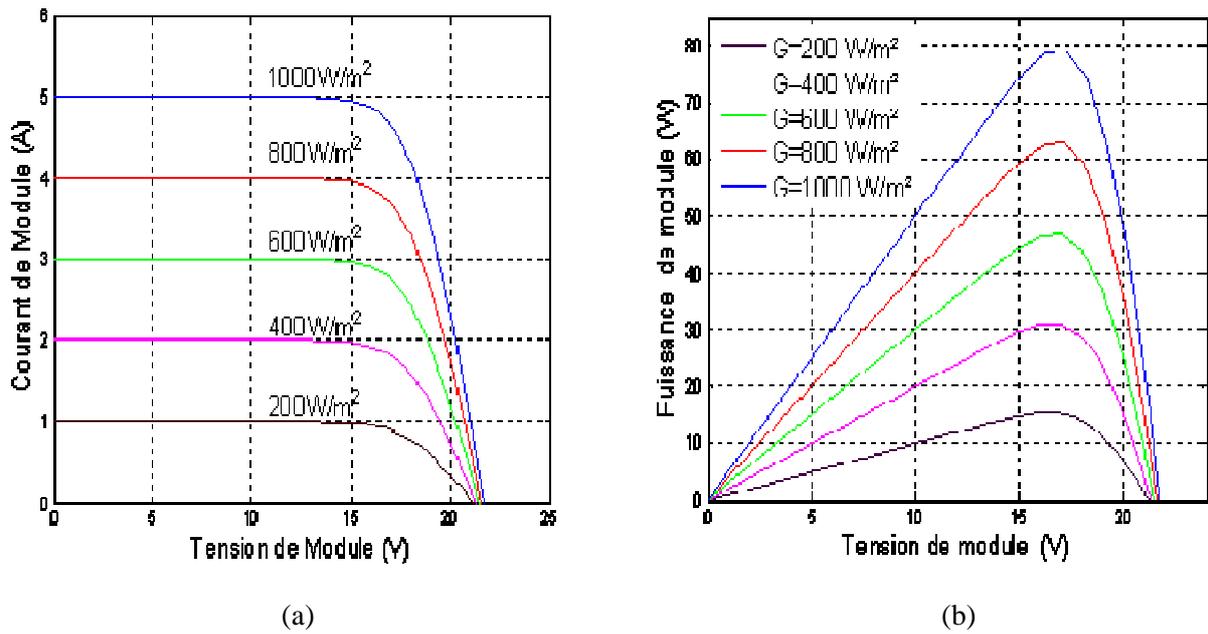


Figure II-26 : Evolution de la caractéristique $I(V)$ (a) et $P(V)$ (b) en fonction de l'irradiation.

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires.

La température a également une influence sur la caractéristique d'un générateur PV. La figure II-27 présente la variation des caractéristiques d'une cellule PV en fonction de la température à un éclairement donné. L'éclairement est ici fixé à $1000\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

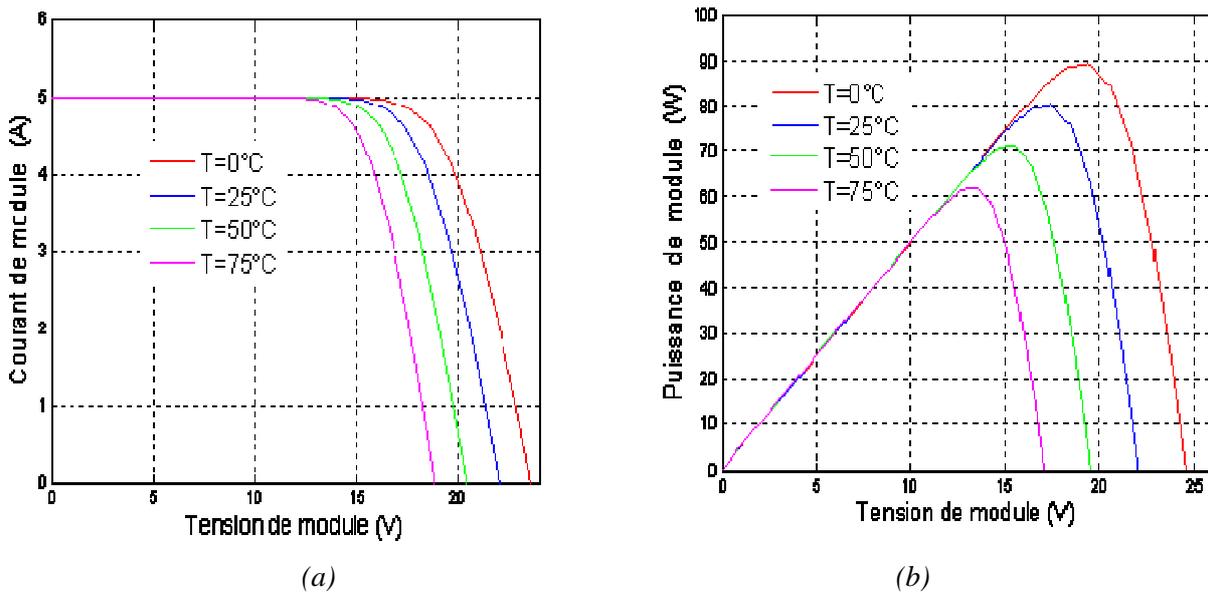


Figure II-27 : Evolution de la caractéristique $I(V)$ (a) et $P(V)$ (b) pour différentes températures.

Par contre, si la température croît à irradiation constante, la tension à vide V_{co} décroît avec la température. Plus la température est élevée plus V_{co} est faible et le courant de court-circuit I_{cc} augmente avec la température. Cette hausse est nettement moins importante que la baisse de tension. L'influence de la température sur I_{cc} peut être négligée dans la majorité des cas.

La température et l'éclairement sont donc les deux principaux paramètres qui vont modifier la caractéristique d'un générateur PV. Ces deux paramètres devront donc être étudiés avec soin lors de la mise en place d'une installation PV.

II-11 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

II-11-1 Les avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages [30] :

- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.

II-11-2 Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le coût très élevé.
- Faible rendement de conversion.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.

- Pollution à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'attendrir, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication [30].

II-12 Conclusion

En résumé, technologiquement, un capteur PV est proche d'une diode PN de par sa constitution, les matériaux utilisés, et les phénomènes physiques identiques mis en œuvre. Le comportement d'une cellule PV peut donc se modéliser comme celui d'une mauvaise jonction PN autant en statique qu'en dynamique lorsque cette dernière n'est pas éclairée.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les enjeux et les développements actuels du photovoltaïque. Nous avons ensuite présenté le fonctionnement d'une cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque (L'effet photovoltaïque). Nous avons vu que la cellule PV présente une caractéristique $I(V)$ non linéaire, présente un point de puissance maximal (PPM) caractérisé par un courant (I_{max}) et une tension (V_{max}) et qu'elle peut être modélisée par un circuit électrique simple. Nous avons présenté l'influence des différents paramètres extérieurs sur cette caractéristique. Le courant de court-circuit évolue principalement avec l'éclairement et la tension à vide avec la température. L'interconnexion de cellules PV en série ou en parallèle pose plusieurs problèmes de déséquilibre qui sont très pénalisants si les cellules n'ont pas le même point de fonctionnement. Nous avons présenté les différentes technologies de cellules actuellement sur le marché et ou cours de développement, et malgré la fin du silicium annoncée depuis de nombreuses années, ce dernier garde une grande longueur d'avance sur les autres technologies. Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules.

III-1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. Ainsi, une étude assez rigoureuse est nécessaire pour faire le meilleur choix le plus performant avec moindre coût possible.

La performance d'un système PV dépend fortement des conditions météorologiques, telle que le rayonnement solaire, la température, la vitesse du vent et l'éclairement. Pour fournir l'énergie continuellement durant toute l'année, un système PV doit être correctement dimensionné. Cependant les informations fournies par les constructeurs d'équipements photovoltaïques ne permettent que de dimensionner approximativement le système [29].

La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque. Le module photovoltaïque est représenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension. 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 V-I à divers points de fonctionnement donnés par le constructeur ou issues de la mesure directe sur le module.

La modélisation de ces dernières s'impose comme une étape cruciale et a conduit à 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.

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles dont les précisions restent tributaires de la modélisation mathématique des différents phénomènes physiques intrinsèques intervenant dans le processus de production d'électricité. Dans la plupart des travaux de la littérature, on trouve principalement le modèle équivalent à quatre paramètres basé sur la modélisation mathématique de la courbe-tension courant [31].

III-2 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, en prenant plus ou moins de détails. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque.

On présentera deux modèles du GPV à savoir [32] :

- Modèle à une diode (ou exponentielle simple),
- Modèle à deux diodes (ou double exponentielle).

Tous les deux sont basés sur l'équation de diode bien connue de Shockley.

Nous avons étudié un module BP Solar 340, présenté sur la figure III-1.



Figure III-1: Module BP Solar340.

Le tableau III-1 donne les caractéristiques du module BP Solar 340 sous les conditions standards (1000 W/m², masse optique: AM 1.5, Température de cellule: 25 °C).

Grandeurs	valeur
Puissance nominale	40 W
Tension au MPP (V_{mp})	16,50 V
Courant au MPP (I_{mp})	2,42 A
Courant de court-circuit (I_{cc})	2.60 A
Tension de circuit ouvert (V_{co})	20.00 V
Coefficient du rendement ε de la température	0.0049 %
Facteur de forme (FF)	0.771
Nombre de cellules en série (N_s)	36
Nombre de cellules en parallèle (N_p)	2
Coefficient de sensibilité de la tension à la température μ_{co}	-0.09 V/K
Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température μ_{cc}	+0,0065 A/K

Tableau III-1: Caractéristiques du module BP Solar 340.

Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque seront décrites comme suit :

- Le courant de court-circuit (I_{cc}) qui fournit chaque cellule est :

$$I_{cc(cellule)} = \frac{I_{cc}}{N_p} \quad (\text{III-1})$$

- La tension du circuit ouvert (V_{co}) de chaque cellule est :

$$V_{co(cellule)} = \frac{V_{co}}{N_s} \quad (\text{III-2})$$

- Le courant maximal de chaque cellule est :

$$I_{mp(cellule)} = \frac{I_{mp}}{N_p} \quad (\text{III-3})$$

- La tension maximale de chaque cellule est :

$$V_{mp(cellule)} = \frac{V_{mp}}{N_s} \quad (\text{III-4})$$

- La puissance maximale de chaque cellule est:

$$P_{\max(cellule)} = I_{mp(cellule)} \cdot V_{mp}(cellule) \quad (\text{III-5})$$

- La résistance série de chaque cellule est :

$$R_{s(cellule)} = \frac{N_p}{N_s} \cdot R_{s(module)} \quad (\text{III-6})$$

- La résistance shunt de chaque cellule est :

$$R_{sh(cellule)} = \frac{N_p}{N_s} \cdot R_{sh(module)} \quad (\text{III-7})$$

III-3 Modèle à deux diodes

III-3-1 Modèle à sept paramètres (2M7P)

Il est connu aussi par le nom 2M7P (Lumped, 2 Mechanism model with 7 Parameters) [28-30]. Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous figure (III-2). Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} , les facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} , qui dépend de l'éclairement solaire [34].

La résistance série R_s rend compte de la résistivité du matériau, de celle des électrodes et du contact semi-conducteur-Métal. Sa valeur est déterminée par l'inverse de la pente de la caractéristique $I(V)$ pour une tension V égale à V_{co} . Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contact métal/semi-conducteur, et en diminuant la résistivité du matériau utilisé. Cependant, un dopage trop élevé entraîne une augmentation de la recombinaison des porteurs.

La résistance parallèle (shunt) ou de court-circuit R_{sh} traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible [22].

Le modèle à deux-diodes est représenté par une équation implicite du courant qui ne peut être résolue qu'à l'aide de méthodes itératives.

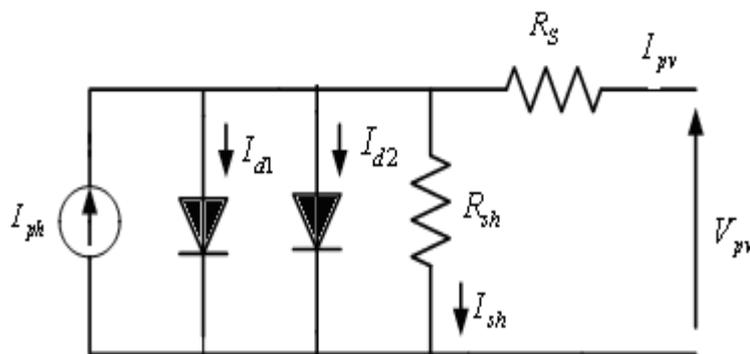


Figure III-2 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M7P.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff [35]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (\text{III-8})$$

Avec:

I_{ph} : courant photonique

I_{d1} : courant de diode 1

I_{d2} : courant de diode 2

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation [35]:

$$I_{d1} = I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_d}{n_1 \cdot V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{III-9})$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V_d}{n_2 \cdot V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{III-10})$$

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (\text{III-11})$$

Avec :

$V_t = \frac{KT_c}{q}$: représentant le potentiel thermodynamique

T_c : est la température absolue

q : la constante de charge d'électron, $1.602 \cdot 10^{-23} \text{C}$

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

I_{sh} : est le courant de la résistance de shunt

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante [35,36]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n_1}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n_2}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{III-12})$$

Le courant photonique lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence est donné par [35,37]:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \left(I_{ph,ref} - \mu_{cc} (T_c - T_{c,ref}) \right) \quad (\text{III-13})$$

Avec:

$I_{ph,ref}$: le courant photonique sous condition de référence [A]

μ_{cc} : coefficient de sensibilité de l'intensité à la température [A/K]

G, G_{ref} : l'éclairement réels et à la condition de référence [W/m²]

$T_c, T_{c,ref}$: la température de cellule, réelle et à la condition de référence

Les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} sont donnés par les relations suivantes [35,38]:

$$I_{s1} = C_{s1} \cdot T_c^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_{gap} \cdot q}{n_1 \cdot T \cdot K}\right) \quad (\text{III-14})$$

$$I_{s2} = C_{s2} \cdot T_c^{3/2} \cdot \exp\left(\frac{-E_{gap} \cdot q}{n_2 \cdot T \cdot K}\right) \quad (\text{III-15})$$

Les constantes C_{s1} et C_{s2} sont généralement comprises respectivement entre 150 - 180 A.K⁻³ et 1,3 - 1,7 x 10⁻² A.K^{-5/2} pour une cellule de 100 cm².

Une valeur du facteur d'idéalité n différent de l'unité est associée à un mécanisme de recombinaison prédominant et elle dépend de la nature et de la position des niveaux pièges.

- $n = 1$: La zone de charge d'espace est dépeuplée (cas idéal).
- $1 < n < 2$: Le niveau piège est peu profond dans la zone de charge d'espace et n dépend de la polarisation [39].
- $n = 2$: Les centres de recombinaison sont distribués uniformément dans la zone de charge d'espace et sur un seul niveau au milieu de la bande interdite.
- $2 < n < 4$: Les centres de recombinaison sont distribués de façon non uniforme avec une densité réduite au centre de la zone de charge d'espace par rapport à la surface

E_{gap} : Energie de gap (Silicium cristallin = 1,12 eV, Silicium amorphe = 1,7 eV, CIS = 1,03 eV, CdTe = 1,5 eV).

III-3-1-1 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle 2M7P

La caractéristique courant-tension nous montre que la cellule PV est une source de courant constante pour des faibles valeurs de la tension avec un courant approximativement égal au courant de court circuit I_{cc} . Avec l'augmentation de la tension, le courant commence à diminuer exponentiellement jusqu'à la valeur zéro où la tension est égale à la tension de circuit ouvert V_{co} . Sur la gamme entière de tension, il y a un seul point où la cellule fonctionne au rendement le plus élevé; c'est le point de puissance maximal (MPP).

Il est possible de déterminer ces caractéristiques par des méthodes numériques itératives. (La méthode de dichotomie, la méthode de Lagrange, la méthode de point fixe et la méthode de Newton Raphson).

La méthode de Newton Raphson est choisie pour la convergence rapide de la réponse [33,40].

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

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

Soit une équation à résoudre de la forme :

$$f(x) = 0 \quad (\text{III-16})$$

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

$$0 = f(x_0 + \delta x) \quad (\text{III-17})$$

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

$$0 = f(x_0) + f'(x_0) \cdot \delta x + \left(\frac{f''(x_0) \cdot \delta x^2}{2!} \right) + \left(\frac{f'''(x_0) \cdot \delta x^3}{3!} \right) + \dots \quad (\text{III-18})$$

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

$$f(x_0) + f'(x_0) \cdot \delta x \approx 0 \quad (\text{III-19})$$

On peut alors isoler la correction recherchée :

$$\delta x = -\frac{f(x)}{f'(x)} \quad (\text{III-20})$$

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

$$x_1 = x_0 + \delta x \quad (\text{III-21})$$

Donc :

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x)}{f'(x)} \quad (\text{III-22})$$

Avec :

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

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

$$f(I_{pv}) = I_{cc} - I_{pv} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{V_t \cdot n_1}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{V_t \cdot n_2}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \right) = 0 \quad (\text{III-23})$$

La substitution de cette équation dans l'équation (III-12) donne l'équation suivante, et le courant de sortie est calculé itérativement.

$$I_{pv(i+1)} = I_{pv(i)} - \frac{I_{cc} - I_{pv(i)} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{V_t \cdot n_1}\right) - 1 \right) - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{V_t \cdot n_2}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}}\right)}{-1 - I_{s1} \cdot \left(\frac{R_s}{V_t}\right) \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{V_t \cdot n_1}\right) - I_{s2} \cdot \left(\frac{R_s}{V_t}\right) \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{V_t \cdot n_2}\right) - \left(\frac{R_s}{R_{sh}}\right)} \quad (\text{III-24})$$

III-3-1-2 Simulation d'une cellule à 2M7P

La stratégie pour modéliser un module PV ne présente aucune différence par rapport à la modélisation d'une cellule PV. Les paramètres sont les mêmes, mais seulement la tension va changer (la tension à circuit ouvert) est différente et doit être divisée par le nombre de cellules. Dans le programme Matlab que nous avons développé des calculs itératifs sont réalisés afin d'assurer la convergence des résultats.

La méthode employée consiste à développer des programmes scripts pour la simulation des différents effets sur les caractéristiques tension-courant et puissance-tension telles que, l'influence de l'éclairement, la température et la résistance shunt.

Les résultats obtenus par une cellule du module BP solar 340 en utilisant le modèle 2M7P sont représentés par la figure III-3

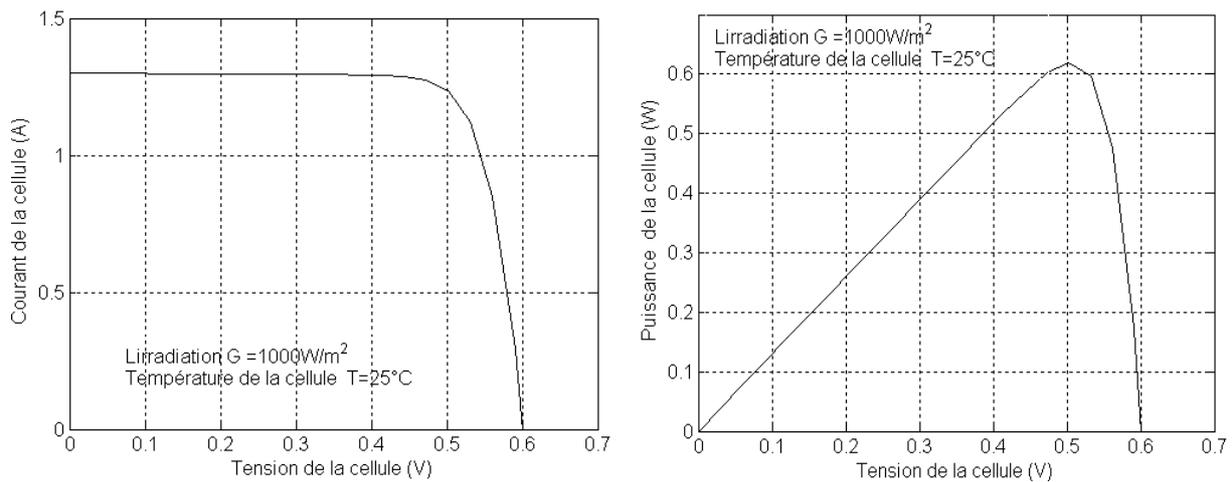


Figure III-3 : Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque 2M7P.

III-3-2 Modèle à six paramètres (2M6P)

Si la résistance shunt est considérée infinie ($R_{sh}=\infty$), le nombre de paramètres à déterminer devient 6 et le nom du modèle dans ce cas est 2M6P (Lumped, 2 Mechanism model with 6 Parameters) [31-33]. Cette simplification est justifiée par le fait que la résistance shunt est d'habitude beaucoup plus grande que les autres résistances donc le courant qui la traverse est négligeable. Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} (équation (III-14)) et I_{s2} (équation (III-15)), les facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} (équation (III-13)) qui dépend de l'éclairement solaire et de la résistance série R_s .

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique, figure (III-4).

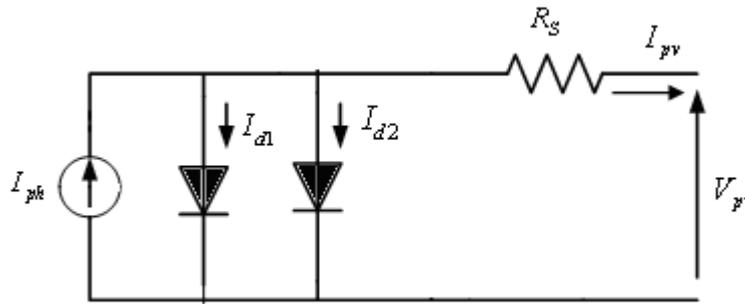


Figure III-4 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M6P.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff [33]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (\text{III-25})$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t n_1}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t n_2}\right) - 1 \right) \quad (\text{III-26})$$

III-3-2-1 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle 2M6P

La méthode de Newton Raphson a été utilisée et le courant de sortie est donné par l'équation (III-27).

$$I_{pv(i+1)} = I_{pv(i)} - \frac{I_{cc} - I_{pv(i)} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{V_t \cdot n_1}\right) - 1 \right) - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{V_t \cdot n_2}\right) - 1 \right)}{-1 - I_{s1} \left(\frac{R_s}{V_t}\right) \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{V_t \cdot n_1}\right) - I_{s2} \left(\frac{R_s}{V_t}\right) \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{V_t \cdot n_2}\right)} \quad (III-27)$$

La Figure III-5 représente la caractéristique courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque en utilisant le modèle 2M6P.

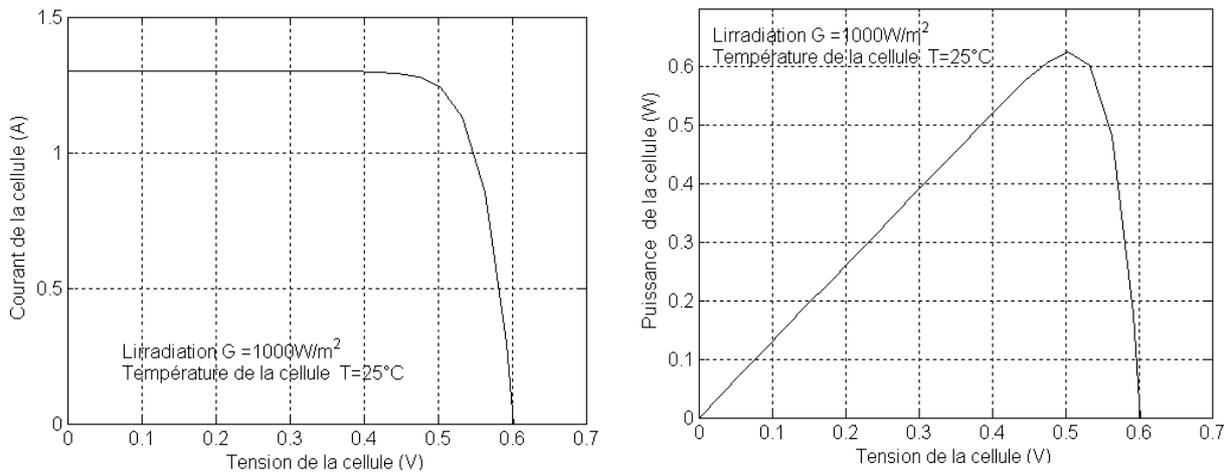


Figure III-5 : Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque, 2M6P.

III-3-3 Modèle à cinq paramètres (2M5P)

Le circuit équivalent de ce modèle est obtenu en utilisant une simplification au circuit du modèle à six paramètres représenté sur la figure (III-5) et le nom du modèle dans ce cas est 2M5P (Lumped, 2 Mechanism model with 5 Parameters) [31-33]. Cette simplification se traduit par supposer que la résistance shunt est infinie, et la résistance série est nulle.

Le circuit équivalent sera représenté comme suit, figure (III-6).

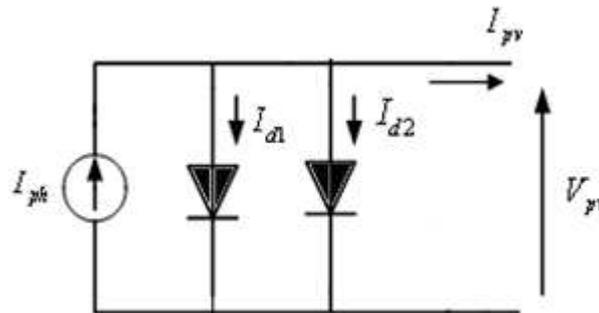


Figure III-6 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M5P.

Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} (équation (III-14)) et I_{s2} (équation (III-15)), les facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant un photocourant I_{ph} (équation (III-13)) qui dépend de l'éclairement solaire et de la température

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (\text{III-28})$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante [33]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{V_t \cdot n_1}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{V_t \cdot n_2}\right) - 1 \right) \quad (\text{III-29})$$

III-3-3-1 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle

2M5P

Le courant de sortie est donné par l'équation (III-30).

$$I_{pv(i+1)} = - \frac{I_{cc} - I_{pv(i)} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{V_t \cdot n_1}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{V_t \cdot n_2}\right) - 1 \right)}{(-1)} \quad (\text{III-30})$$

La Figure III-7 représente la caractéristique courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$ pour les mêmes conditions; une température de référence de 25 °C et un éclairement de 1000 W/m².

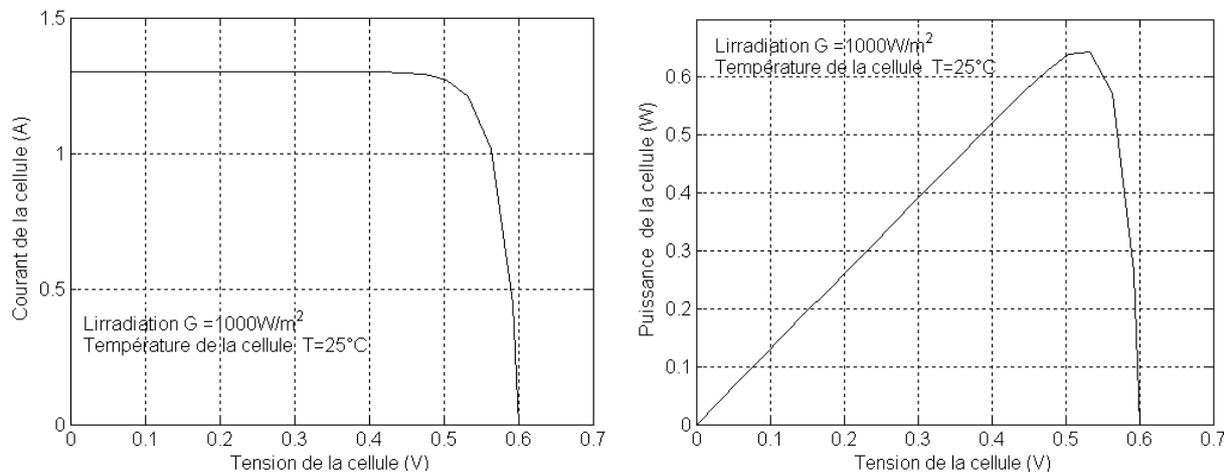


Figure III-7 : Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque, 2M5P.

III-4 Modèle à une diode

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode établi par Shocky pour une seule cellule PV. Il est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle [4].

Une description plus simple est obtenue à partir du modèle à une exponentielle. Ce modèle comporte une diode de moins par rapport au modèle à deux exponentielles, ce qui implique que ce modèle comporte dans l'équation de la caractéristique courant- tension une exponentielle de moins [43], [44].

III-4-1 Modèle à trois paramètres (L3P)

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} (équation (III-13)) proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition P-N de la cellule PV. Il est connu aussi sous le nom L3P (Lumped, 1 Mechanism model with 3 Parameters) [7-30]. Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode.

Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté par la figure (III-8) :

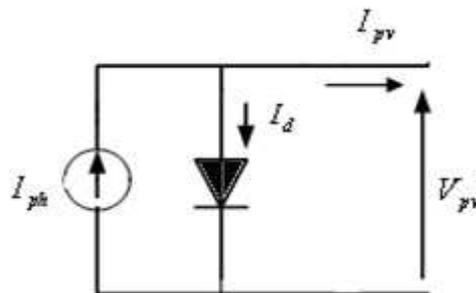


Figure III-8 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L3P.

Dans le cas de cellules solaires au silicium monocristallin, on considère l'hypothèse d'une cellule idéale. Le facteur d'idéalité est alors considéré comme égal à l'unité.

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{III-31})$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation [11-33] :

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{III-32})$$

Le courant débité équivaut à :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{V_t \cdot n}\right) - 1 \right) \quad (\text{III-33})$$

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression [45-46-47]:

$$I_s = I_{s_ref} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{c_ref}}\right)^3 \exp\left(\left(\frac{q \cdot E_{gap}}{n \cdot K}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{c_ref}}\right) - \left(\frac{1}{T_c}\right)\right) \quad (\text{III-34})$$

III-4-1-1 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle L3P

Le courant de sortie est donné par l'équation (III-35).

$$I_{pv(i+1)} = I_{pv(i)} - \frac{I_{cc} - I_{pv(i)} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{V_t \cdot n_1}\right) - 1 \right)}{-1} \quad (\text{III-35})$$

La Figure III-9 représente la caractéristique courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque en utilisant le modèle L3P.

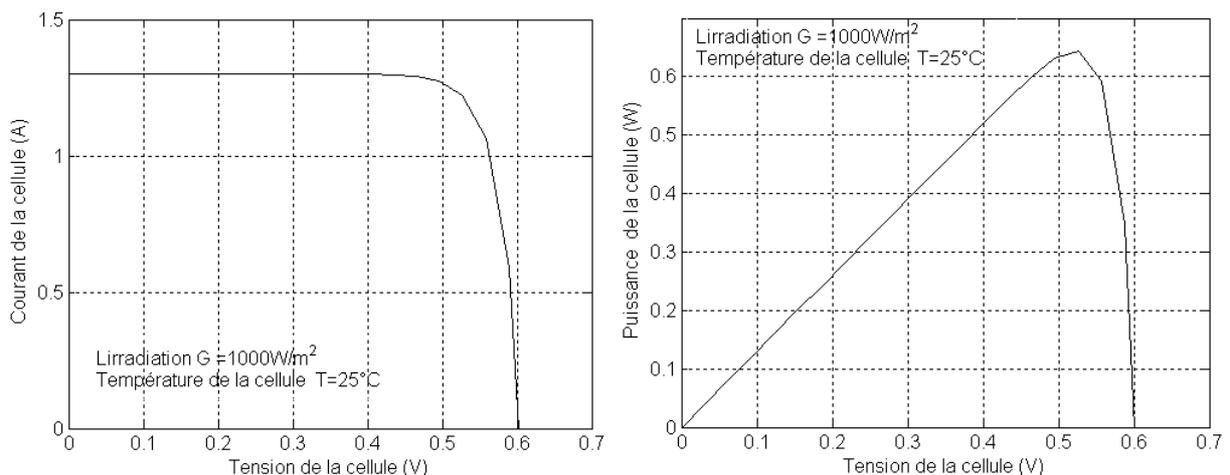


Figure III-9 : Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque, L3P.

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans les conditions réelles. Toutefois, il reste valable sous certaines hypothèses (non prise en compte des pertes de tension, courant de fuite...). Il existe d'autres modèles, certes théoriques, mais qui rendent plus fidèlement compte du comportement de la cellule photovoltaïque [11-31].

III-4-2 Modèle à quatre paramètres (L4P)

Le modèle à quatre paramètres est un modèle largement utilisé; il a été étudié par Townsend [33]. Ce modèle traite la cellule photovoltaïque comme une source de courant, dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série R_s .

Les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique $I(V)$ sont le courant photonique I_{ph} (équation (III-13)), la résistance série R_s , et deux caractéristiques de la diode I_s (équation (III-28)), et n . Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants. Par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations $I(V)$ pour différents points de fonctionnement (donnés par les fabricants) [40-47].

Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté sur la figure (III-10) :

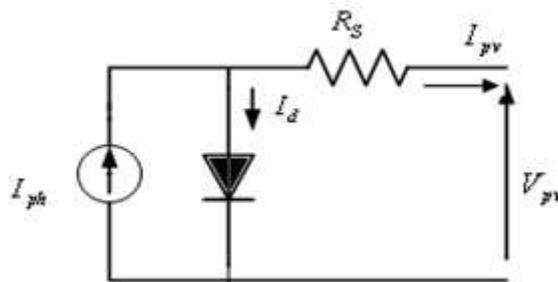


Figure III-10 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L4P.

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t n}\right) - 1 \right) \quad (\text{III-36})$$

III-4-2-1 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle L4P

Le courant de sortie est donné par l'équation (III-37).

$$I_{pv(i+1)} = I_{pv(i)} - \frac{I_{cc} - I_{pv(i)} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} R_s}{V_t n}\right) - 1 \right)}{-1 - I_s \left(\frac{R_s}{V_t}\right) \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} R_s}{V_t n}\right)} \quad (\text{III-37})$$

La Figure III-11 représente la caractéristique courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$ relatif à ce modèle.

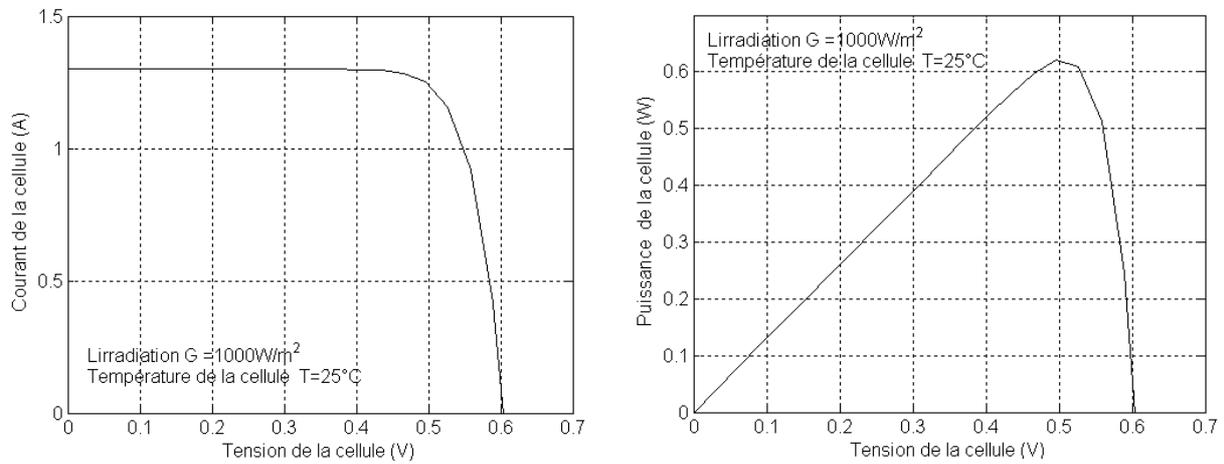


Figure III-11 : Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque, L4P.

III-4-3 Modèle à cinq paramètres (L5P)

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique de la figure (III-12) qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, les pertes sont modélisées par deux résistances, une résistance shunt, une résistance série. Le modèle fait donc intervenir les cinq paramètres inconnus suivants: n , I_{ph} (équation (III-13)), R_s , R_{sh} et I_s (équation (III-28)). Il est connu sous le nom L5P (Lumped, 1 Mechanism, Parameters) [33-45].

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{III-38})$$

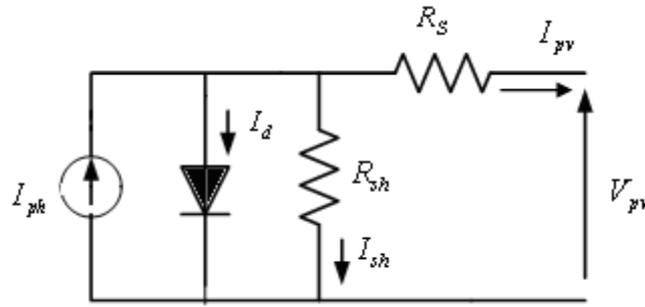


Figure III-12 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L5P.

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante [45]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t \cdot n}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \right) \tag{III-39}$$

III-4-3-1 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle L5P

Le courant de sortie est donné par l'équation (III-40).

$$I_{pv(i+1)} = I_{pv(i)} - \frac{I_{cc} - I_{pv(i)} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} R_s}{V_t \cdot n_1}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} R_s}{R_{sh}} \right)}{-1 - I_s \left(\frac{R_s}{V_t} \right) \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} R_s}{V_t \cdot n_1}\right) - \left(\frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \tag{III-40}$$

La figure III-13 représente la caractéristique courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$ en considérant ce modèle.

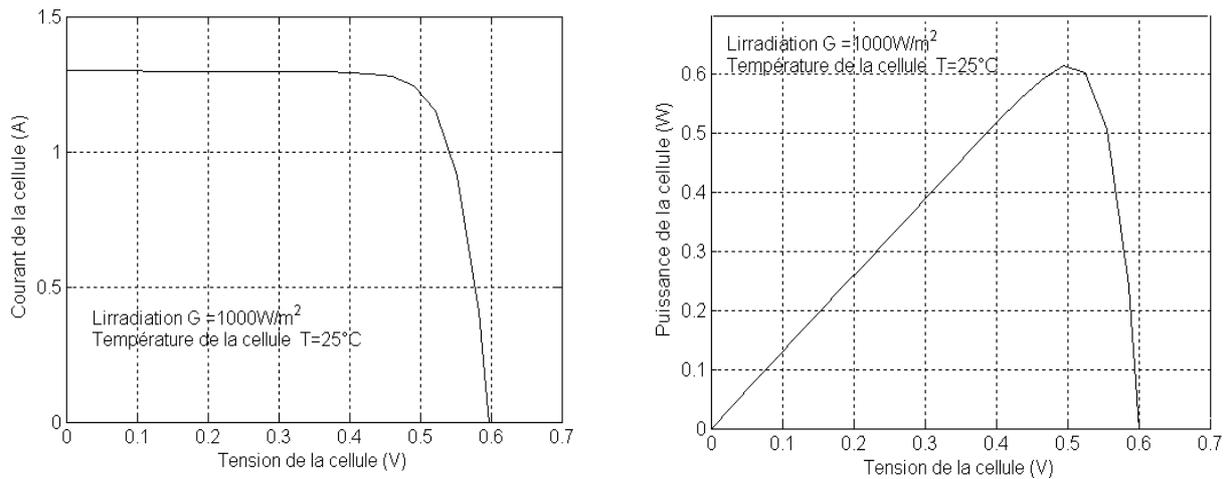


Figure III-13 : Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque, L5P.

III-5 Etude comparative

III-5-1 Influence de la résistance shunt

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes d'une photopile. En général, la résistance shunt est très élevée [42], son effet se fait sentir surtout dans la partie génération de courant.

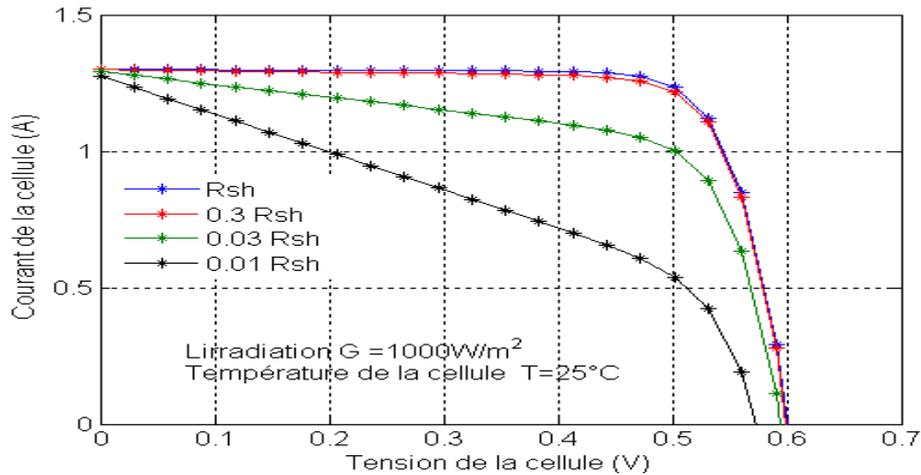


Figure III-14 : L'influence de la résistance shunt (R_{sh}) sur la caractéristique $I(V)$.

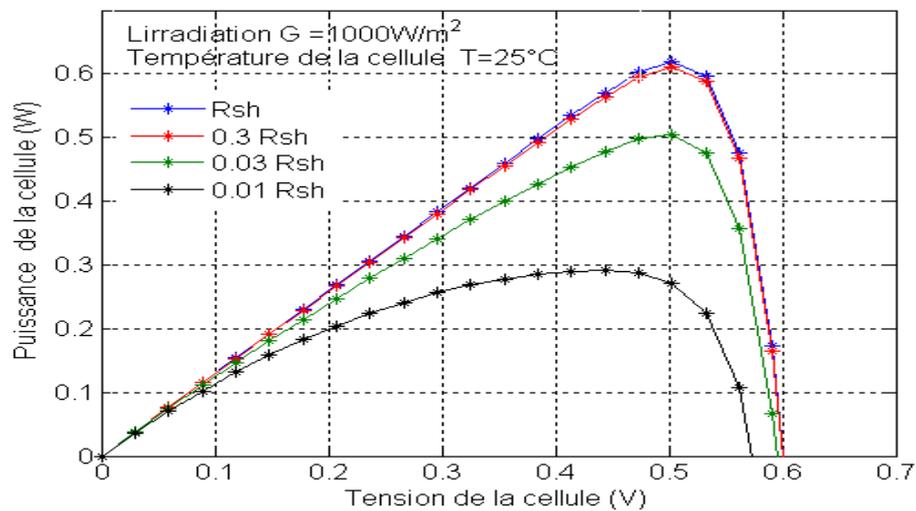


Figure III-15 : L'influence de la résistance shunt (R_{sh}) sur la caractéristique $P(V)$.

L'influence de la résistance parallèle (shunt) sur la caractéristique courant-tension se traduit par une légère diminution de la tension de circuit ouvert, et une augmentation de la pente de la courbe $I-V$ de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de courant.

Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée. La puissance fournie par une cellule solaire varie avec sa résistance parallèle, plus cette résistance est élevée plus la puissance fournie est importante.

Une comparaison de l'effet de la résistance shunt sur le comportement des caractéristiques $I(V)$, $P(V)$ est illustrée sur les figures (III-16) et (III-17), aux niveaux d'irradiance de 1000 W/m^2 et de 250 W/m^2 .

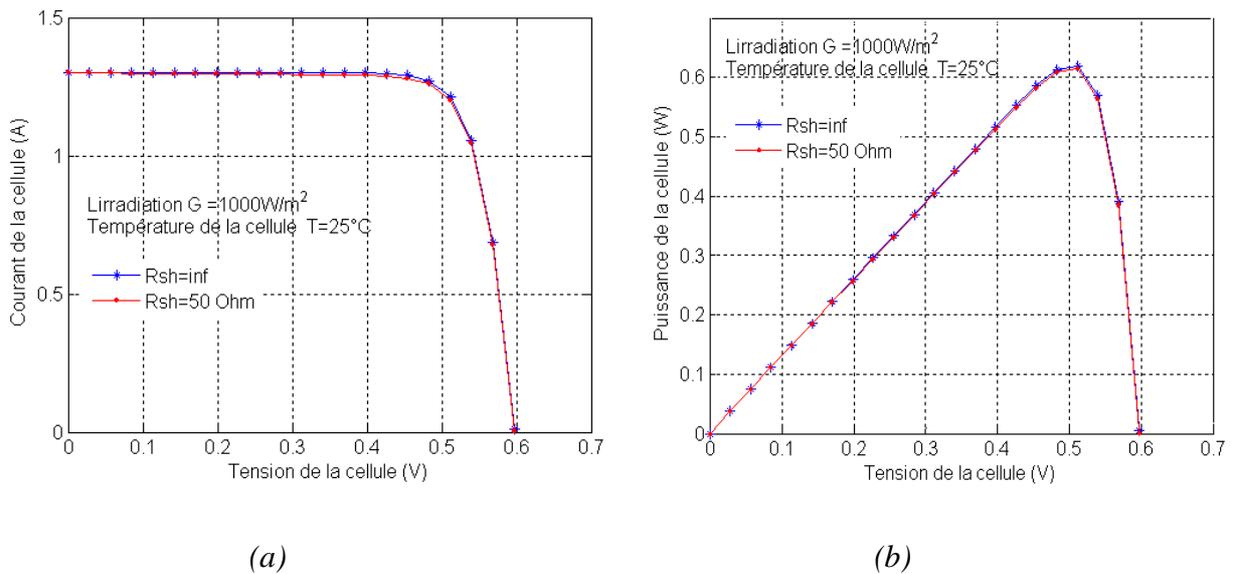


Figure III-16 : L'influence de la résistance shunt (R_{sh}) sur les caractéristiques $I(V)$ (a), $P(V)$ (b), $G=1000\text{W/m}^2$.

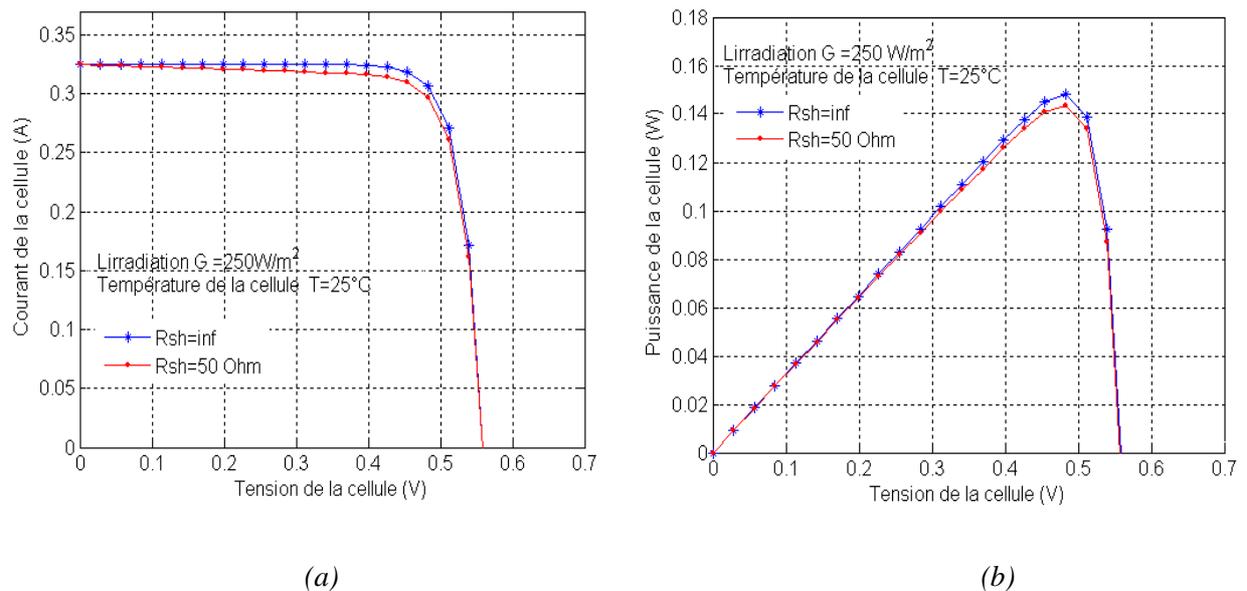


Figure III-17 : L'influence de la résistance shunt (R_{sh}) sur les caractéristiques $I(V)$ (a), $P(V)$ (b), $G=250\text{W/m}^2$

Une courbe assume la résistance infinie de shunt tandis que l'autre assume une résistance de shunt de 50 ohms. À 1000 W/m^2 , la différence entre les deux courbes est à peine perceptible. La différence dans la puissance maximale pour ces deux courbes est environ 0,5%. Pour l'irradiance inférieure ($G=250\text{W/m}^2$) représentée sur la figure (III-17), la différence entre les deux courbes est plus prononcée et la différence dans la puissance maximale est environ 4,2%.

Une autre justification partielle pour la résistance infinie, que les courants de shunt ne sont pas un mécanisme inhérent de perte dicté par les propriétés matérielles. Les courants de shunt sont principalement dus à la fuite courante le long des bords de la cellule, et ces effets sont réduits au minimum en construisant le module dans un cadre de bons isolateurs électriques [31].

III-4-2-2 Influence de la résistance série

Les figures (III-18, III-19) montrent l'influence de la résistance série sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ de la cellule photovoltaïque.

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension. Elle ne modifie pas la tension du circuit ouvert, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur du courant de court circuit.

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

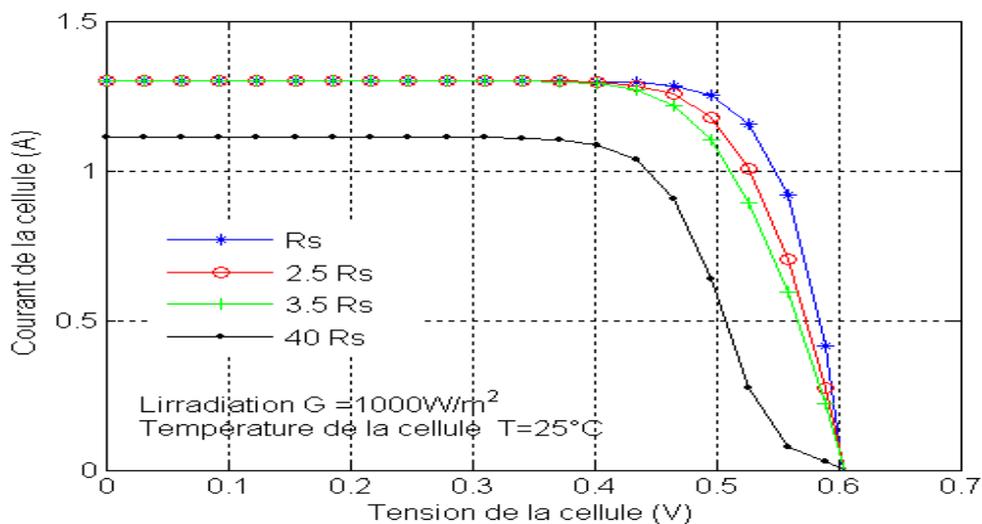


Figure III-18 : L'influence de la résistance shunt (R_s) sur la caractéristique $I(V)$ d'une cellule.

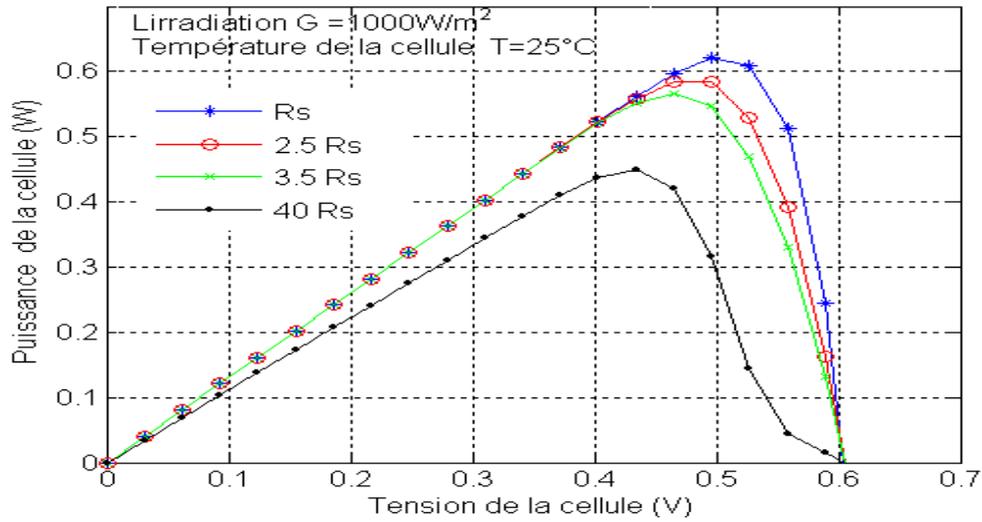


Figure III-19 : L'influence de la résistance shunt (R_s) sur la caractéristique $P(V)$ d'une cellule.

Pour permettre un ensemble cohérent de comparaisons pour un modèle donné, la même condition de référence est choisie pour chaque modèle, (la performance de la cellule solaire est normalement évaluée dans les conditions d'essai normalisé (STC), où un spectre solaire moyen de AM 1.5 est employé, l'éclairement est normalisé à $1000W/m^2$, et la température de $25^\circ C$).

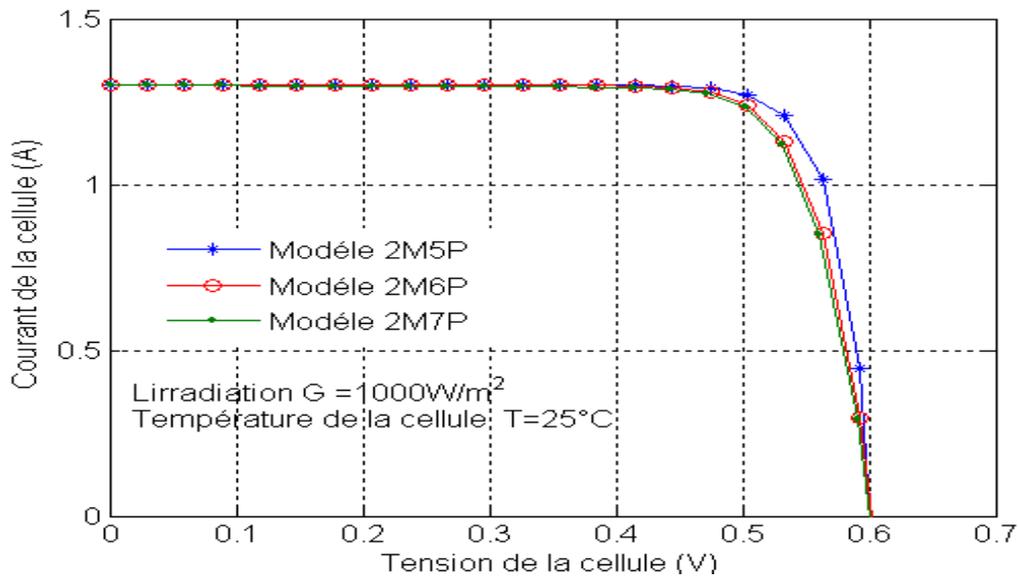


Figure III-20: Caractéristiques I-V pour les modèles à deux exponentielles.

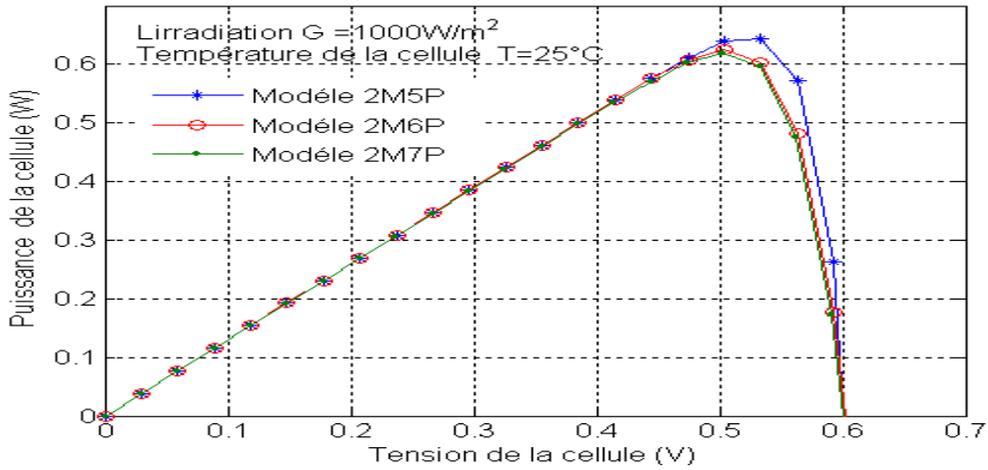


Figure III-21: Caractéristiques P-V pour les modèles à deux exponentielles.

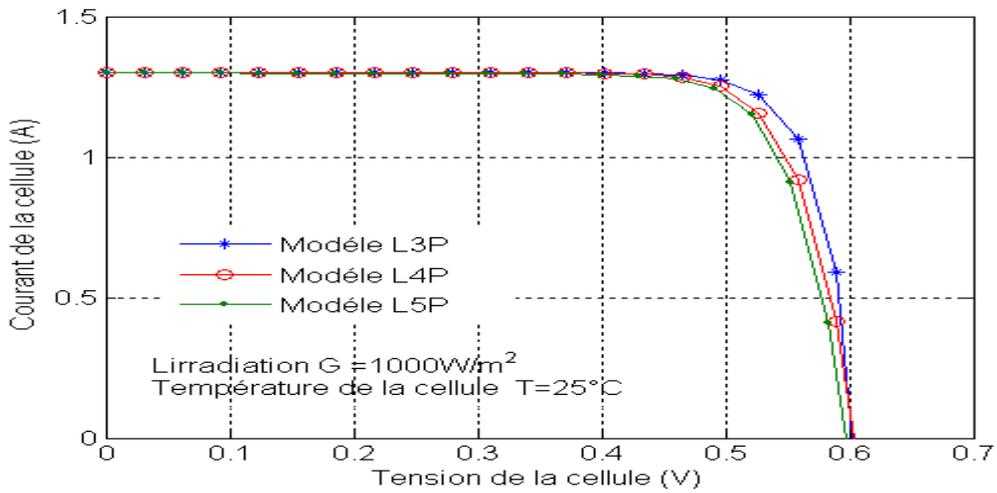


Figure III-22: Caractéristiques I-V pour les modèles à une exponentielle.

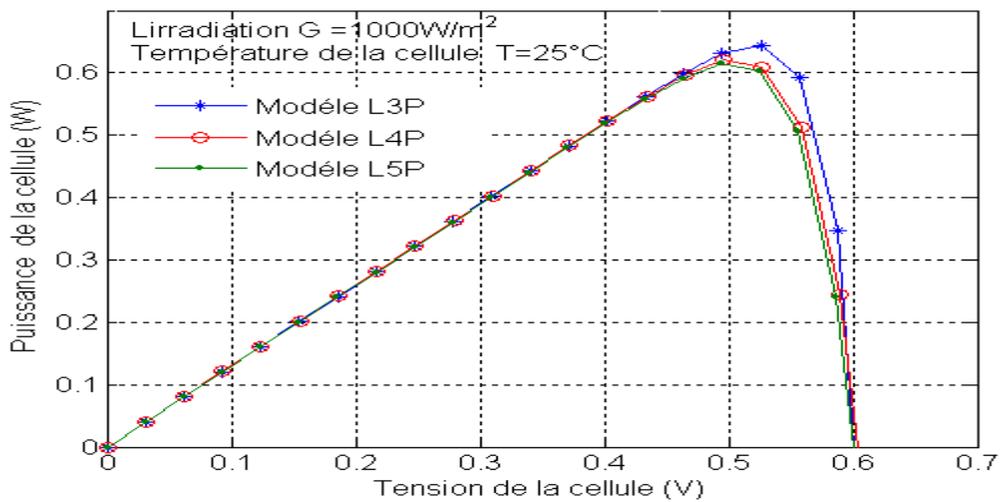


Figure III-23: Caractéristiques P-V pour les modèles à une exponentielle.

Les figures (III-20, III-21) comparent entre les différents modèles à deux diodes et les figures (III-22, III-23) à son tour comparent les différents modèles à une diode pour une température de référence de 25 °C et un éclairement de 1000 W/m².

Une comparaison entre les résultats de simulation obtenus par ces modèles et les résultats expérimentaux, Townsend [31] et R. Khezzer et al [30] nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

En comparant les modèles 2M7P, 2M6P, et L5P on constate que l'effet de la résistance parallèle est négligeable, par contre en négligeant la résistance série dans le modèle 2M5P et le modèle L3P, cela induit un éloignement entre les résultats expérimentaux et ceux du modèle. Ce qui montre l'importance de la résistance série qui marque la différence entre les différents modèles. Les courbes I-V globales, obtenues par les modèles L4P et 2M6P sont plus précises.

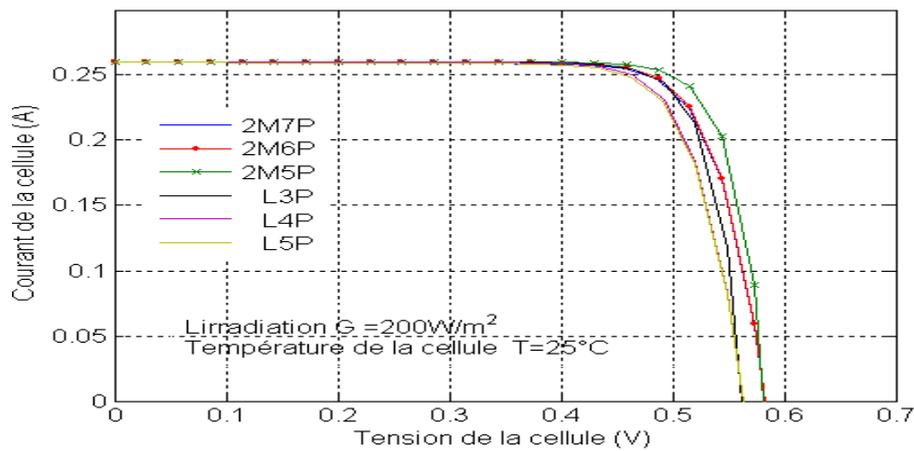


Figure III-24: Caractéristiques I-V pour les modèles à une exponentielle et à deux exponentielles, $G=250W/m^2$.

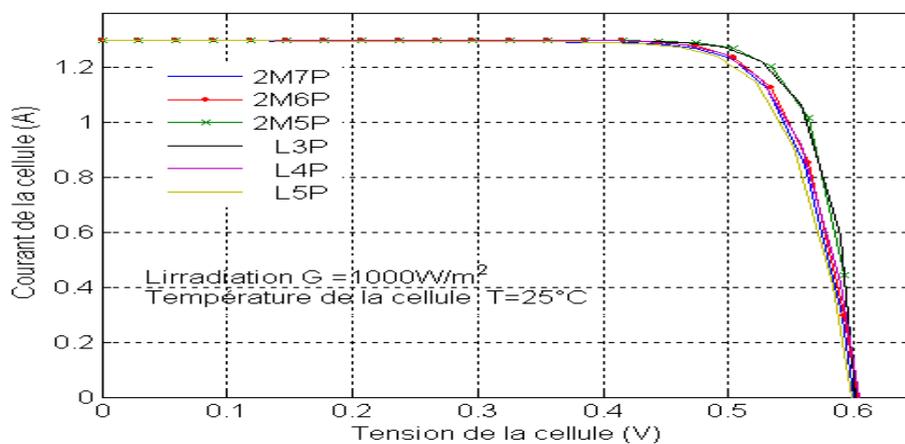


Figure III-25: Caractéristiques I-V pour les modèles à une exponentielle et à deux exponentielles, $G=1000W/m^2$.

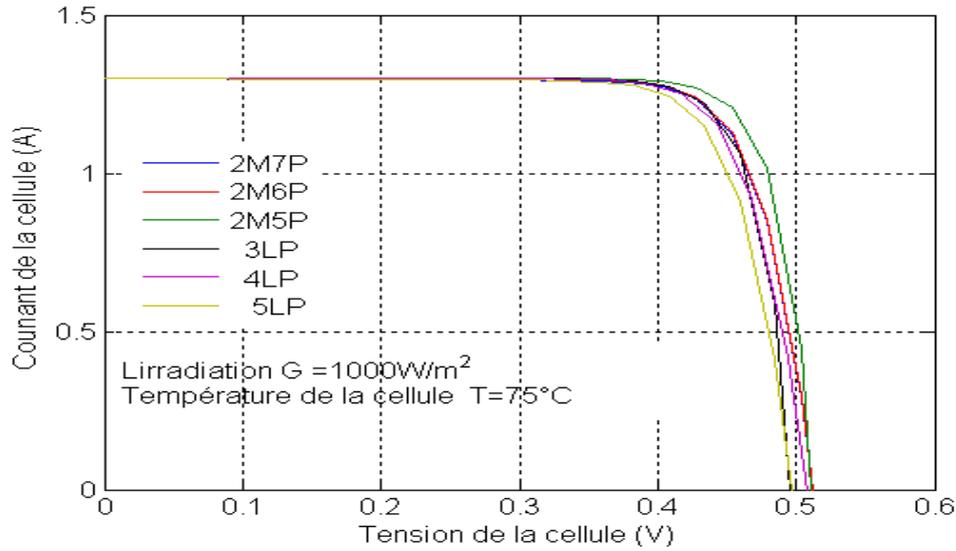


Figure III-26: Caractéristiques I-V pour les modèles à une exponentielle et à deux exponentielles, $T=75^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$.

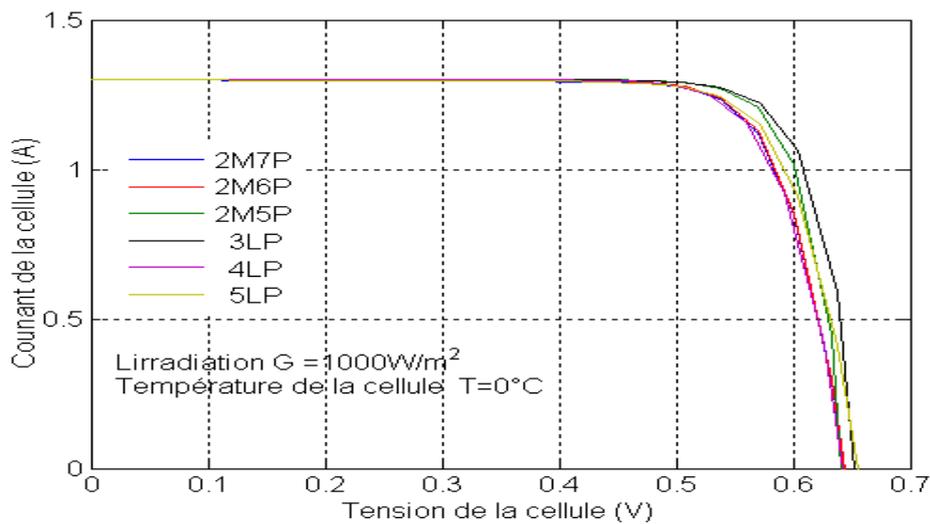


Figure III-27: Caractéristiques I-V pour les modèles à une exponentielle et à deux exponentielles, $T=0^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$.

les figures (III-24), (III-25), (III-26) et (III-27) montrent que les résultats obtenus par les modèles à deux diodes (deux exponentielles) marquent un point important aux niveaux de la zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_s à R_{sh} (la zone 3 où se situe le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale), la puissance fournie et la tension de circuit ouvert obtenues par ces modèles sont supérieures par rapport aux modèles à une diode quand les irradiances sont basses et la température élevée.

Le modèle à deux diodes a un léger avantage, car il fait appel à la recombinaison des porteurs minoritaires dans le volume du matériau. (Les branches de chacune des diodes représentent respectivement le courant de diffusion dans la base et l'émetteur (I_{d1}), et le courant de génération-recombinaison (I_{d2}) dans la zone de charge d'espace de la jonction (ZCE)).

III-6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques électriques fondamentales d'une cellule photovoltaïque (module photovoltaïque) et les circuits équivalents ont été décrits. Des modèles mathématiques de complexité variable ont été discutés (modélisation), aussi bien que des critères pour choisir un modèle convenablement détaillé. Nous avons vu que la cellule PV présente une caractéristique $I(V)$ non linéaire dont il est possible de résoudre l'équation des caractéristiques. Bien qu'il puisse être possible de trouver la réponse par des plusieurs méthodes, la méthode de Newton Raphson est choisie pour sa convergence rapide. Six modèles d'une cellule photovoltaïque ont été évalués. D'après les résultats de simulation, on peut dire que :

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que R_s est grande ou que R_{sh} est faible.

La représentation d'une cellule photovoltaïque par le circuit équivalent à une ou à deux diodes semble correcte. Malgré ça, le modèle à deux diodes présente quand même un léger avantage, car il fait appel à la recombinaison des porteurs minoritaires dans le volume du matériau. Le modèle à deux diodes est très bon si l'on possède une quantité suffisante de données expérimentales pour déterminer l'ensemble des paramètres.

Une comparaison entre ces modèles a montré que le modèle L4P combine entre la simplicité et la précision parce qu'il fournit des données qui sont comparables aux données expérimentales [30,31].

IV-1 Introduction

Le photovoltaïque a trouvé son utilité dans des applications à petites échelles et pour des systèmes de transmissions isolés. L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie intéressante. Elle est renouvelable, inépuisable et non polluante. Pour qu'elle soit utilisée sur une large plage d'applications et pour satisfaire les contraintes du coût, le système devrait présenter une bonne exploitation des cellules photovoltaïques. Pour cela, il faut extraire le maximum de puissance du générateur PV.

La conception de systèmes photovoltaïques optimisés est par nature difficile. En effet, côté source, pour un générateur photovoltaïque, la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, mais aussi du vieillissement global du système. Ces variables influençant le comportement du système présentent des fluctuations quotidiennes et saisonnières. Pour ces raisons, le panneau photovoltaïque ne peut fournir une puissance maximale que pour une tension particulière et un courant bien déterminé ; ce fonctionnement à puissance maximale dépend de la charge à ses bornes, que ce soit de nature continue, ou bien alternative.

Pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui jouera le rôle d'adaptateur source-charge. Pour des conditions données, c'est au point de puissance maximale de la caractéristique puissance en fonction de la tension que l'on exploite au mieux la puissance crête installée. Ces points correspondent donc au point de puissance optimale, terme traduisant le caractère relatif aux conditions d'éclairement et de température de la puissance fournie [4].

En général, il y a beaucoup de modèles mathématiques simplifiés permettant de déterminer la puissance maximale fournie par un générateur photovoltaïque en fonction des variations de l'irradiation solaire et la température ambiante, par exemple; Borowy et Salameh (1996) [50], ont donné un modèle simplifié, avec lequel la puissance maximale produite peut être calculée pour un certain module photovoltaïque une fois l'irradiation solaire sur le module photovoltaïque et la température sont déterminées. En 2002, Jones et Underwood [49] ont proposé un autre modèle permettant de calculer la puissance électrique maximale aux bornes d'un capteur photovoltaïque. Cette dernière a un rapport réciproque avec la température du module et elle a en plus une relation logarithmique avec l'éclairement solaire

absorbé par le module photovoltaïque. En outre, Jones et Underwood [49] ont donné le modèle thermique du module photovoltaïque à travers l'évaluation de beaucoup de facteurs.

En 2004, Lu Lin [52] a proposé un autre modèle permettant de calculer la puissance maximale fournie par un module photovoltaïque pour un ensoleillement et une température du module donnés avec quatre paramètres constants à déterminer expérimentalement.

L'étude bibliographique a fait ressortir qu'il existe deux approches concernant la modélisation des capteurs photovoltaïques. La première nécessite d'effectuer des mesures sur le capteur une fois installé. C'est le cas des modèles de Sandia et Cenerg [49]. La deuxième approche consiste à se baser uniquement sur les données fournies par les constructeurs.

Ils font apparaître comme paramètre la température du module, qui n'est autre que la température de fonctionnement des cellules photovoltaïques [49].

Dans ce chapitre, nous présenterons d'abord quatre modèles mathématiques simplifiés permettant de déterminer la puissance maximale en fonction des variations des conditions météorologiques (irradiation solaire et température ambiante). Ces modèles sont basés aussi sur les caractéristiques techniques du module (données du constructeur), et puis nous comparons les modèles présentés.

IV-2 Calcul de la puissance maximale à la sortie du module PV

IV-2-1 Modèle de Borowy et Salameh (modèle 1) [50]

En 1996, Borowy et Salameh ont proposé un modèle permettant de calculer la puissance électrique maximale aux bornes d'un capteur photovoltaïque. Ce modèle est basé sur le circuit équivalent à une diode, figure (IV-1).

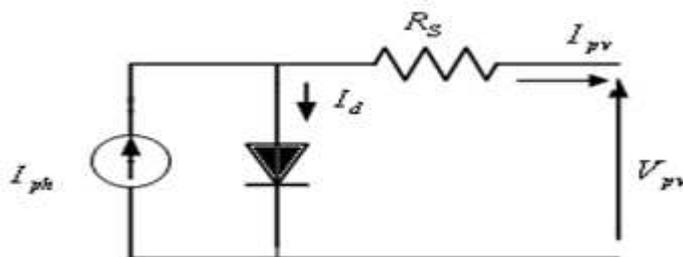


Figure IV-1 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle.

Ce modèle fait usage des spécifications des modules PV offertes par les fabricants, donc il offre une façon très simple de calculer la puissance produite par les modules PV [49, 50,].

Les formules pour calculer le point optimum de tension et le courant sous des conditions arbitraires sont montrées comme suit :

$$I_{max} = I_{cc} \left(1 - C_1 \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{max}}{C_2 \cdot V_{co}}\right) - 1 \right) \right) + \Delta I \quad (IV-1)$$

Avec :

I_{max} : est le courant maximum correspondant au point de fonctionnement du module de PV

I_{cc} : le courant de court circuit du module

V_{co} : la tension du circuit ouvert du module

C_1 et C_2 sont des paramètres qui peuvent être calculés par l'équation (IV-2) et (IV-3) respectivement.

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{cc}} \right) \cdot \exp\left(\frac{-V_{mp}}{C_2 \cdot V_{co}}\right) \quad (IV-2)$$

$$C_2 = \frac{V_{mp}/V_{co} - 1}{\ln(1 - I_{mp}/I_{cc})} \quad (IV-3)$$

I_{mp} : le courant maximal sous conditions standards ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$)

V_{mp} : la tension maximale du module sous conditions standards

La tension V_{max} du module est déterminée par l'équation suivante :

$$V_{max} = V_{mp} \left(1 + 0.0539 \cdot \ln\left(\frac{G}{G_0}\right) \right) + \beta_0 \cdot \Delta T - R_s \cdot \Delta I \quad (IV-4)$$

Avec :

G : éclairement solaire incident sur un plan incliné (W/m^2).

α_0 : coefficient du courant en fonction de la température ($\text{A}/^\circ\text{C}$)

β_0 : le coefficient de la tension en fonction de la température ($\text{V}/^\circ\text{C}$)

G_0 : l'irradiation solaire de référence sous conditions standards, ($1000\text{W}/\text{m}^2$)

La résistance série R_s est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts des faces avant et arrière du panneau photovoltaïque.

ΔI , est un paramètre qui dépend de la différence de température et de l'éclairement solaire. Il est défini par équation (IV-5).

$$\Delta I = \alpha_0 \cdot \left(\frac{G}{G_0}\right) \cdot \Delta T + \left(\frac{G}{G_0} - 1\right) \cdot I_{cc} \quad (\text{IV-5})$$

Avec :

$$\Delta T = T_c - T_0 \quad (\text{IV-6})$$

$T_0 = T_{c_ref}$: la température de cellule à la condition de référence

T_c : température de la cellule, qui varie en fonction de l'éclairement et de la température ambiante, selon la relation linéaire suivante :

$$T_c = T_a + ((NOCT - 20)/800) \cdot G \quad (\text{IV-7})$$

T_a : température ambiante

$NOCT$: température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal Operating Cell Temperature). Elle est définie comme étant la température de la cellule, si le module est soumis sous certaines conditions comme l'éclairement solaire (800 W/m^2), la distribution spectrale (AM 1.5), la température ambiante ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) et la vitesse de vent ($> 1 \text{ m/s}$);

Alors la puissance optimale à la sortie d'un module est déterminée par :

$$P_{max1} = I_{max} \cdot V_{max} \quad (\text{IV-8})$$

Pour un nombre de modules séries N_s et N_p parallèles, la puissance maximale produite est déterminée par :

$$P_{max1} = N_s \cdot N_p \cdot I_{max} \cdot V_{max} \quad (\text{IV-9})$$

IV-2-2 Modèle de Jones et Underwood (modèle 2) [51]

En 2000, Jones et Underwood [51].ont proposé un autre modèle permettant de calculer la puissance électrique maximale aux bornes d'un capteur photovoltaïque. La puissance maximale est donnée par relation suivante :

$$P_{max2} = FF \cdot \left(I_{cc} \cdot \frac{G}{G_0}\right) \cdot \left(V_{CO} \cdot \frac{\ln(K_1 \cdot G)}{\ln(K_1 \cdot G_0)} \cdot \frac{T_0}{T_c}\right) \quad (\text{IV-10})$$

Où K_1 est un coefficient constant, qui peut être calculé par la formule suivante :

$$K_1 = \frac{I_{cc}}{G_0} \quad (\text{IV-11})$$

Avec :

FF : facteur de forme

Le "facteur de forme" (fill factor) est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir un module photovoltaïque et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale).

$$FF = \frac{P_{mp}}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{IV-12})$$

Avec :

P_{mp} : la puissance maximale sous conditions météorologiques standards ($G = 1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$)

IV-2-3 Modèle de benchmark (modèle 3) [52]

Ce modèle a été élaboré et validé expérimentalement par Lu Lin en 2004 [52], il nous permet de déterminer la puissance maximale fournie par un module PV pour un ensoleillement et une température du module donnés, avec seulement quatre paramètres constants positifs à déterminer, a, b, c et d, qui peuvent être connus expérimentalement, plus un système d'équations simple à résoudre résultant en un ensemble de points de mesures suffisamment étendu [52, 49].

$$P_{max3} = -(a \cdot G + b) \cdot T_c + c \cdot G + d \quad (\text{IV-13})$$

Avec :

P_{max3} : puissance maximale produite (W)

Selon des mesures expérimentales effectuées sur un module BP Solar de 340 W, les constantes a, b, c et d sont égales, respectivement à 0.0002, 0.0004, 0.1007 et 0.1018 [52].

IV-2-4 Modèle de puissance Entrée/Sortie (modèle 4)

IV-2-4-1 Puissance à l'entrée du champ photovoltaïque

L'énergie produite par un générateur photovoltaïque est estimée à partir des données de l'irradiation globale sur un plan incliné, de la température ambiante et des données du constructeur pour le module photovoltaïque utilisé.

La puissance à l'entrée P_e du champ PV est donnée par [53] :

$$P_e = S.N.G \quad (\text{IV-14})$$

Avec :

S : la surface du module photovoltaïque (m^2)

G : l'irradiation solaire sur un plan incliné (W/m^2)

N : le nombre de module constituant le champ photovoltaïque

Le rendement maximum η_{ch} de conversion du champ photovoltaïque est donné par la relation suivante :

$$\eta_{ch} = \frac{P_{max4}}{G.S.N} \quad (\text{IV-15})$$

Le rendement n'est pas constant, il dépend de la température T et du rayonnement, la relation du rendement est [53, 54]:

$$\eta_{ch} = \eta_0 \cdot \eta_G \cdot \eta_T \quad (\text{IV-16})$$

Avec

η_0 : Rendement de résistance des modules constituant le champ photovoltaïque sous conditions standards ($T_c=25^\circ\text{C}$, $G_0=1000\text{W}/\text{m}^2$)

η_G : Facteur de correction du rendement du champ du rayonnement, défini par :

$$\eta_G = a' - \frac{b'}{G_0} \quad (\text{IV-17})$$

a' et b' sont des valeurs déterminées expérimentalement ($a'=1.059$ et $b'=31.444\text{W}/\text{m}^2$)

η_T : Facteur de correction du rendement du à la température de jonction, défini par :

$$\eta_T = 1 - \varepsilon(T_c - T_0) \quad (\text{IV-18})$$

Avec :

ε : coefficient du rendement de température ($^{\circ}\text{C}$) déterminé expérimentalement, il est défini comme étant la variation du rendement du module pour une variation de 1°C de la température de la cellule. Les valeurs typiques de ce coefficient se situent entre 0.004 et 0.006 ($^{\circ}\text{C}$) [48, 53].

IV-2-4-2 La puissance à la sortie du champ photovoltaïque

La puissance à la sortie ($P_s = P_{max4}$) du champ photovoltaïque est donnée par la relation suivante [54]:

$$P_{max4} = \eta_{ch} \cdot P_e = \eta_{ch} \cdot G \cdot S \cdot N \quad (\text{IV-19})$$

D'où :

$$P_{max4} = \eta_0 \cdot \eta_G (1 - \varepsilon(T_c - T_0)) \cdot G \cdot S \cdot N \quad (\text{IV-20})$$

L'intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données par le constructeur dans les conditions standards (la puissance totale, la tension en circuit ouvert (V_{co}), le courant de court-circuit (I_{cc}) et la surface du panneau).

IV-3 Etude comparative

Après la présentation des quatre modèles mathématiques, nous avons développé un programme informatique script sous Matlab de telle façon que chacun de ces programmes de calcul peut délivrer l'erreur relative commise en fonction de la température du module entre les valeurs estimées par le modèle d'essai de Lu lin et celles estimées par les autres modèles traités dans le but de synthétiser les résultats et de faire une étude comparative.

Le module PV utilisé est BP Solar 340 constitué de 36 cellules connectées en série [50], les caractéristiques du module sous les conditions standards sont données dans le chapitre III.

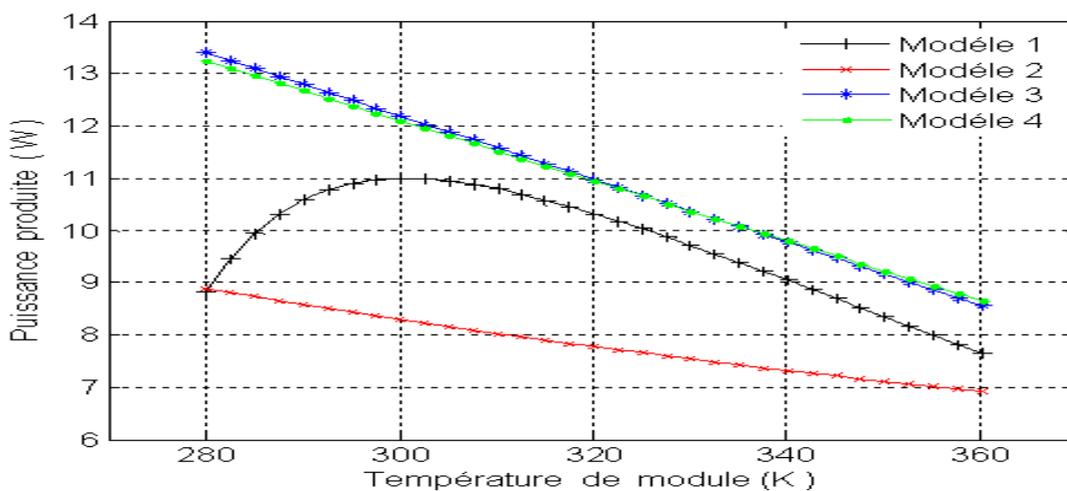


Figure IV-2 : Puissance maximale en fonction de la température, $G = 300 \text{ W/m}^2$.

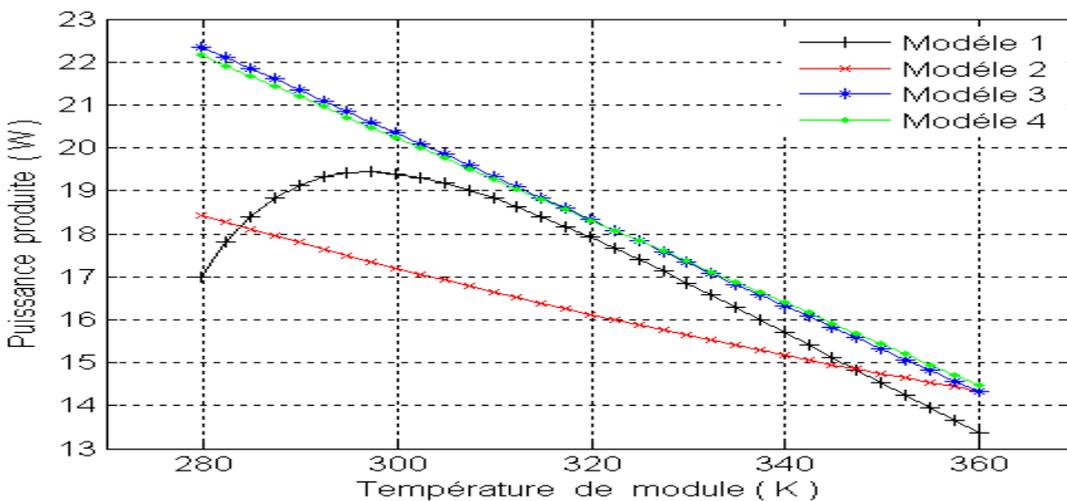


Figure IV-3 : Puissance maximale en fonction de la température, $G = 500 \text{ W/m}^2$.

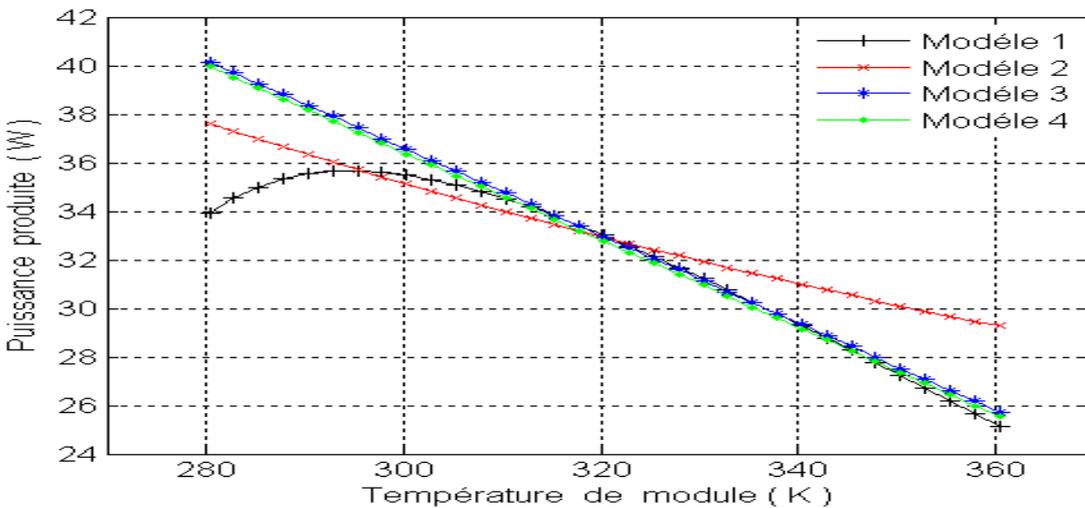


Figure IV-4 : Puissance maximale en fonction de la température, $G = 900 \text{ W/m}^2$.

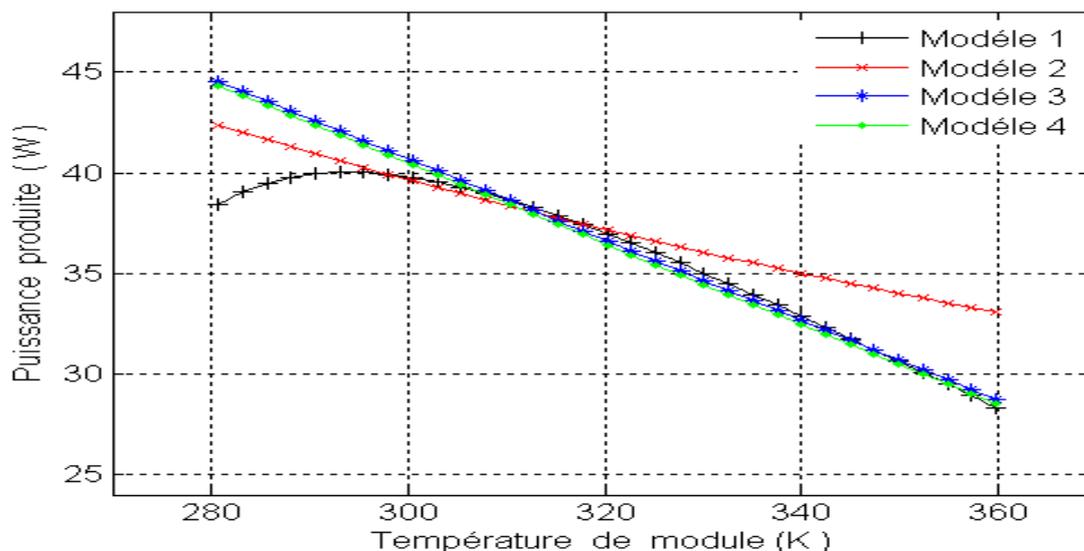


Figure IV-5 : Puissance maximale en fonction de la température, $G = 1000 \text{ W/m}^2$.

IV-4 Interprétation des résultats

Les études sont effectuées pour plusieurs valeurs de l'éclairement solaire à savoir 300 W/m^2 , 500 W/m^2 , 900 W/m^2 et 1000 W/m^2 . Les résultats qui sont présentés sur les figures (IV-2), (IV-3), (IV-4) et (IV-5) donnent la variation de la puissance maximale en fonction de la température du module photovoltaïque. On remarque, que la puissance maximale délivrée est inversement proportionnelle à la température du module PV pour les modèles 2, 3 et 4. Pour le premier modèle, la puissance augmente à partir de la température 280 K jusqu'à atteindre un point maximal correspondant à une température de 300 K pour la figure (IV-2) puis chute d'une manière linéaire. On constate le même comportement pour les figures (IV-3), (IV-4) et (IV-5) mais les puissances maximales obtenues sont différentes suivant les valeurs des irradiations.

Le tableau ci-dessous donne les valeurs de la puissance maximale obtenues pour chaque modèle du module photovoltaïque pour différentes irradiation :

Irradiation (W /m ²)	300	500	900	1000
Puissance maximale du module PV (W)				
Puissance maximale du Modèle 1	11.000	19.450	35.659	40.031
Puissance maximale du Modèle 2	8.894	18.431	37.659	42.383
Puissance maximale du Modèle 3	13.392	22.352	40.152	44.540
Puissance maximale du Modèle 4	13.241	22.155	39.966	44.331

Le tableau IV-1 : La puissance maximale obtenue pour chaque modèle du module PV pour différentes Irradiations.

Les résultats représentés dans le tableau IV-1 montrent que la puissance délivrée par le modèle 3 est plus importante par rapport aux autres modèles (Modèles 1 et 2), car il donne un résultat proche de celui donné par le constructeur dans les conditions normales (Puissance de 40W).

De plus, si on compare les résultats des modèles 3 et 4 on remarque que ces deux modèles donnent des résultats comparables pour différentes valeurs de températures et d'irradiations.

En considérant que le modèle 3 est semi empirique dont les coefficients sont déterminés expérimentalement, en plus de sa caractéristique linéaire par rapport à la température et l'éclairement, il est considéré comme étant le modèle de référence pour comparer les différents modèles.

Les figures (IV-6) à (IV-11) représentent les erreurs relatives de la puissance pour chaque valeur de l'éclairement solaire par rapport au modèle expérimentale de référence [52].

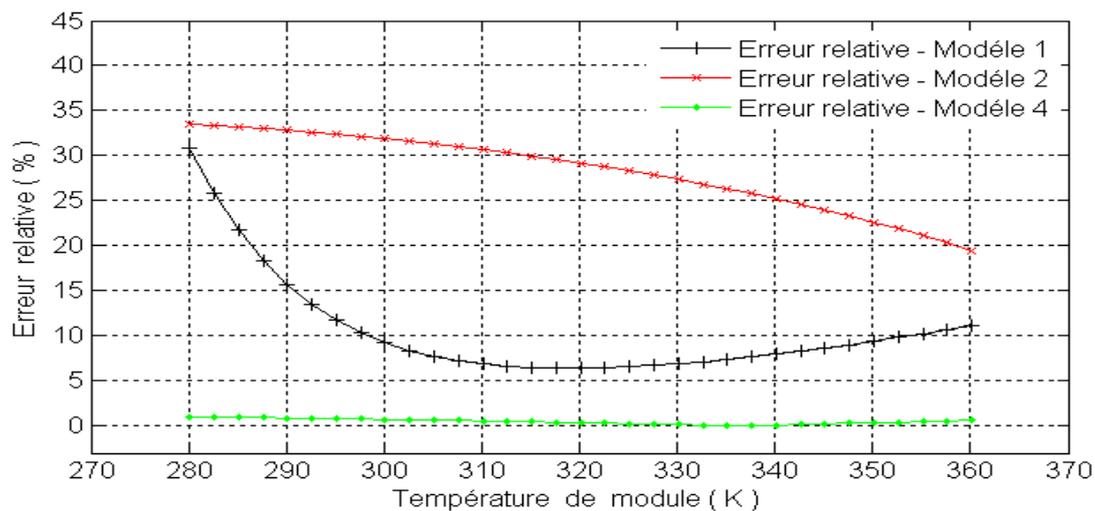


Figure IV-6 : Erreur relative commise par les différents modèles, $G = 300 \text{ W/m}^2$.

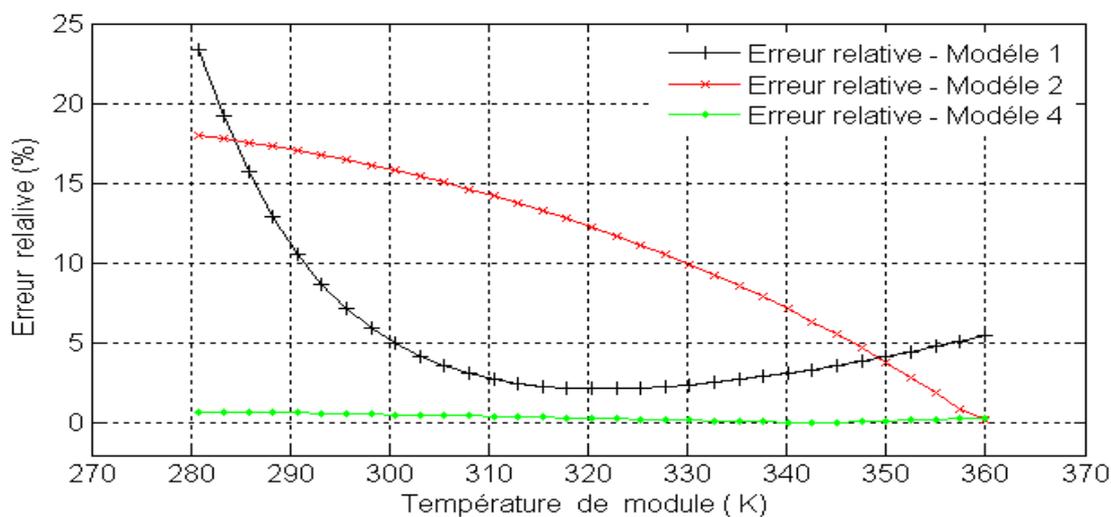


Figure IV-7 : Erreur relative commise par les différents modèles, $G = 500 \text{ W/m}^2$.

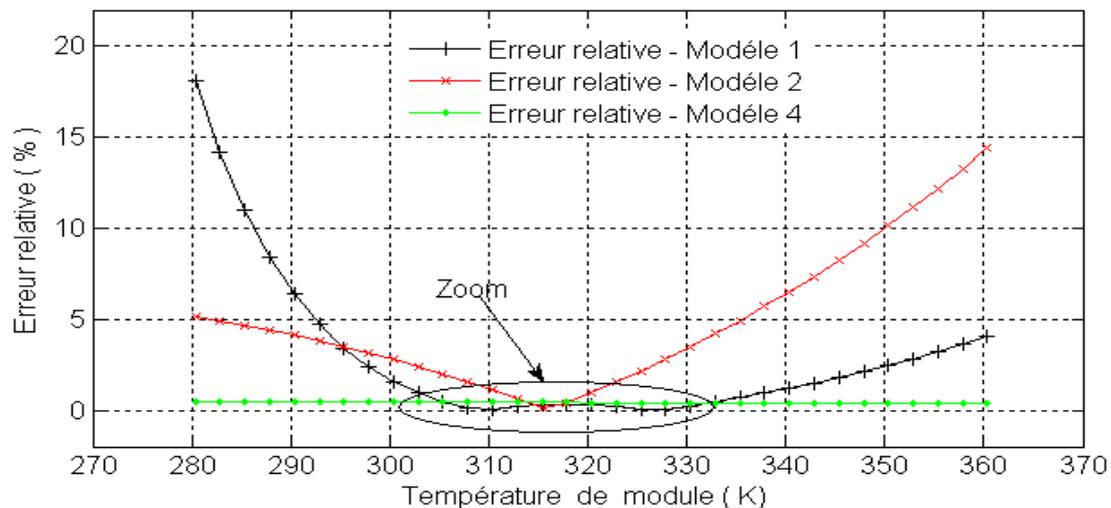


Figure IV-8 : Erreur relative commise par les différents modèles, $G = 900 \text{ W/m}^2$.

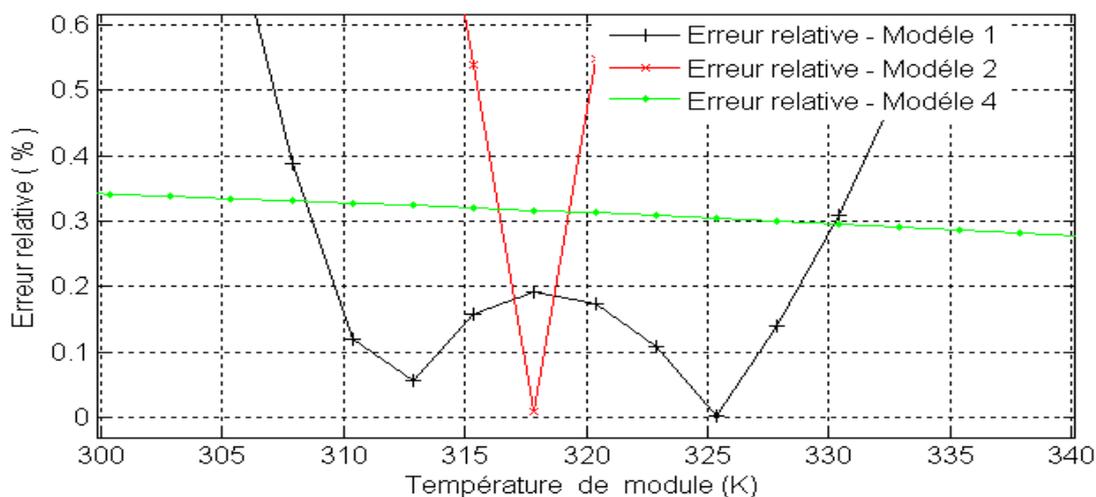


Figure IV-9 : Zoom- Erreur relative commise par les différents modèles, $G = 900 \text{ W/m}^2$.

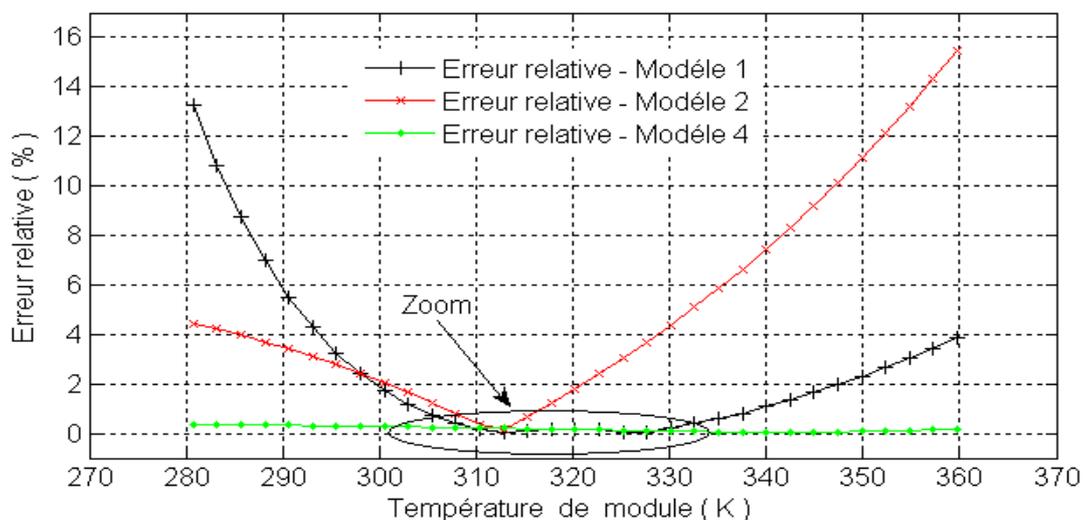


Figure IV-10 : Erreur relative commise par les différents modèles, $G = 1000 \text{ W/m}^2$.

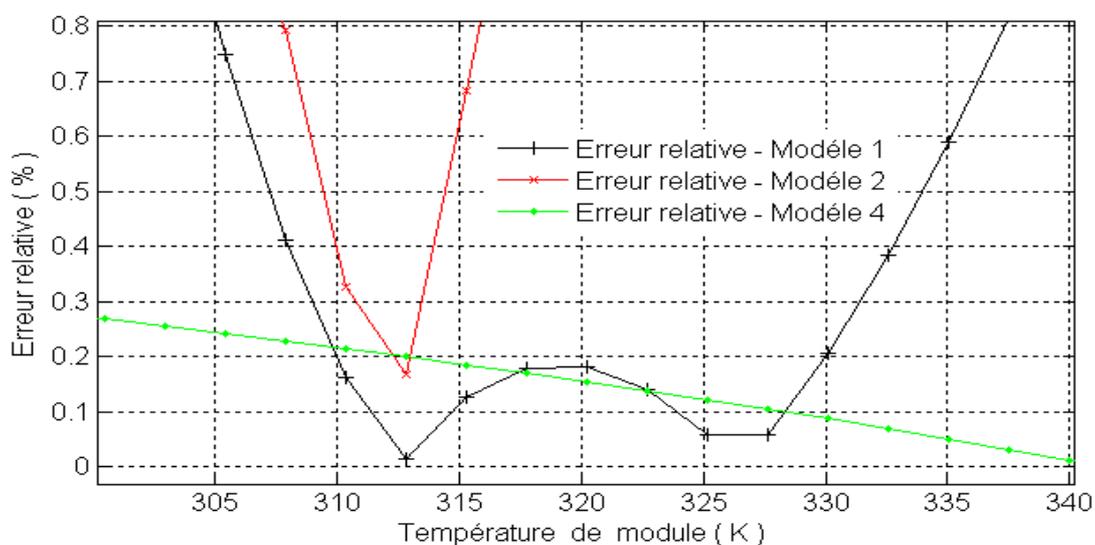


Figure IV-11 : Zoom- Erreur relative commise par les différents modèles, $G = 1000 \text{ W/m}^2$.

En analysant ces résultats, on peut dresser les remarques suivantes :

Les résultats de simulation du modèle 4 sont en très bon accord avec le modèle de référence. De plus, l'erreur est linéaire en fonction de la température et de l'éclairement, cette erreur ne dépasse pas 0.5% dans tous les cas.

Le modèle 1 donne des résultats très éloignés par rapport au modèle de référence surtout pour des faibles températures où l'erreur dépasse 25%. Lorsque l'éclairement solaire est supérieur à 900W/m^2 et des températures entre 300K et 330K l'erreur devient faible.

L'erreur relative au modèle 2 est considérable, surtout pour des faibles éclaircissements (elle varie entre 20% et 35% pour $G=300\text{W/m}^2$), ceci peut être expliqué par l'utilisation du coefficient FF (facteur de forme) dans la formule en donnant la puissance maximale.

IV-5 Conclusion

Le dimensionnement d'une installation photovoltaïque revient à déterminer le nombre nécessaire des modules solaires constituant le champ photovoltaïque dans le but d'opter pour un système photovoltaïque suffisant afin de couvrir les besoins et la capacité de charge de la batterie. Pour avoir un dimensionnement optimal, il nous est apparu indispensable d'utiliser un modèle mathématique cohérent. A cet effet, nous avons présenté dans ce chapitre, quelques modèles mathématiques permettant de calculer la puissance délivrée par le module solaire photovoltaïque. Nous avons ensuite, comparé les autres modèles, dans le but primordial est de déduire le meilleur ou le plus optimal au modèle basé sur des essais [52].

D'après les résultats de la simulation numérique, nous avons constaté que les valeurs délivrées par le modèle 4 sont en très bon accord avec le modèle de référence. De plus, l'erreur est linéaire en fonction de la température et de l'éclairement. Le modèle 1 donne des résultats avec moins d'erreurs quand l'irradiation solaire est supérieure ou égale à 900W/m^2 et une température supérieure à 27°C . Donc on peut dire que le modèle de *Borowy* et *Salameh* peut être recommandé dans le cas où l'irradiation solaire est très élevée et la température de la cellule est supérieure à 27°C . Le modèle 2 donne une grande erreur surtout quand l'irradiation solaire est très basse. Il est donc très difficile de se prononcer sur l'exactitude de tel ou tel modèle en l'absence de résultats expérimentaux fiables. C'est pour cette raison que nous recommandons de refaire ce travail et de ne comparer les résultats des modèles aux résultats qu'on doit obtenir sur un banc d'essais maintenant disponible au niveau du laboratoire des Technologies Avancées de Génie Electrique (LATAGE).

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent la modélisation d'un système de production d'électricité photovoltaïque. L'étude est basée sur la comparaison de plusieurs modèles simple diode et double diodes pour la détermination des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un système de panneaux photovoltaïques.

En effet, pour la conception des systèmes photovoltaïques, la donnée la plus utile concernant les relevés 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 simple diode 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 a conduit à 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. Nous avons vu que la cellule PV présente une caractéristique $I(V)$ non linéaire, pour la résolution nous avons utilisé la méthode de Newton Raphson par souci de convergence et de non complexité. Les résultats de comparaison montrent que la résistance série marque la différence entre les différents modèles et que le modèle à quatre paramètres (LAP) combine entre la simplicité et la précision et présente le choix que nous estimons le plus intéressant. Dans ce modèle, l'effet de la résistance shunt est négligé du fait que sa valeur est importante.

Dans une seconde phase, nous nous sommes intéressés à la puissance maximale qu'on peut extraire d'un panneau photovoltaïque

En effet, la production d'énergie électrique à l'aide de panneau photovoltaïque présente un point optimum de fonctionnement, c'est-à-dire, qu'il existe une tension aux bornes du générateur pour laquelle la puissance récoltée est maximale. Ce point optimum a une particularité de varier avec l'éclairement et la température. Nous avons présenté quatre modèles mathématiques permettant de calculer la puissance maximale à la sortie du module photovoltaïque en fonction des conditions météorologiques (Eclairement solaire et température du module). Selon les résultats de comparaison et les remarques citées, on peut dire que le modèle 1 et 2 peuvent être appliqués avec exactitude dans les applications pratiques pour les conditions normales (Eclairement de 1000 W/m^2 , masse optique: AM 1.5, Température de cellule: $25 \text{ }^\circ\text{C}$), et que le modèle 4 est le plus optimal car il donne les plus petites erreurs comparé au modèle de référence qui se base sur les données expérimentales et cela pour les différents valeurs d'éclairement et de la température. De plus, cette erreur est linéaire.

Cependant, il nous est très difficile de conclure sur l'exactitude d'un tel ou tel modèle en l'absence de données expérimentales fiables. C'est pour cela qu'on recommande de faire les essais sur les panneaux solaires installés au niveau du laboratoire des Technologies Avancées de Génie Electrique (LATAGE) et de comparer les résultats expérimentaux aux résultats des modèles qu'on peut reproduire facilement en exécutant les programmes que nous avons développés sous MATLAB.

Références bibliographiques

- [1] Alonso Corinne « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003.
- [2] Angel Cid Pastor « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». Thèse de Docteur. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [3] Vighetti Stéphane « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion ». Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.
- [4] Soltane Belakehal « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables ». Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [5] Cabal. Cédric « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [6] José Miguel Navarro « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible ». Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [7] Roshanak Radbeh « Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones ». Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2008.
- [8] 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.
- [9] Rémi Bettignies « Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués ». Thèse de doctorat, Ecole Doctorale d'Angers ,2003.
- [10] 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.

- [11] Akassewa Tchapo Singo « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome ». Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [12] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho « Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays ». IEEE Transaction on power electronics, Vol.24, No 5, 1198-1208, May 2009.
- [13] Zouache Foudil « Etude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïques ». Mémoire de magister en Electronique, Université Mentouri de Constantine 2009.
- [14] Anne Labouret et Michel villos « Energie solaire photovoltaïque ». Edition Lemoniteur , 2005.
- [15] Rorni Abdelhalim « Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire ». Mémoire de magister en électrotechnique Université, Mentouri de Constantine 2009.
- [16] Benis Halouma « Contribution à la modélisation du problème de Hot Spot dans les modules solaire Photovoltaïque occultées ». Mémoire de magister en électrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [17] Bouden Abdmalek « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de magister en électrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [18] Amina Benhammou « Optimisation d'un nouveau système de séchage solaire modulaire pour plantes aromatiques et médicinales ». Thèse de doctorat, Université de Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2010.
- [19] Bakkouche Sidi Mohammed El Amine « Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires ». Thèse de doctorat en Physique, Université de Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2009.
- [20] Souad Saadi « Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan ». Mémoire de magister en Physique, Université Mentouri de Constantine, 2010.

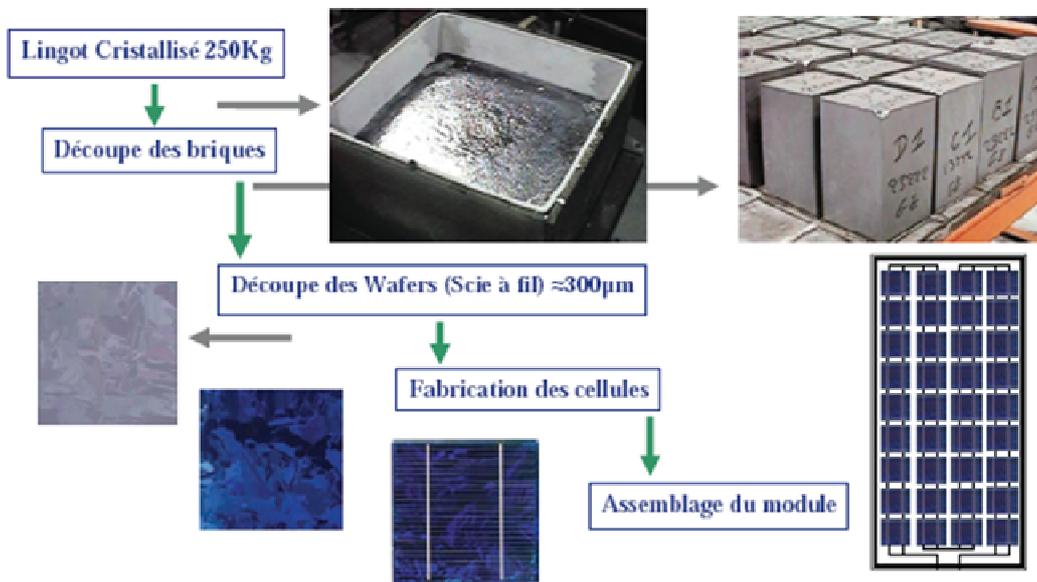
- [21] Laronde Rémi « Essais Accélérés de Dégradation de Modules photovoltaïques ». Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2009.
- [22] Petibon Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [23] L. de Schoulepnikoff et Gymnase Auguste Piccard « Quelle source d'énergie pour les vingt prochaines années? ». Travail de maturité Alexandra Catana, 3M7, 2009.
- [24] Loïc Bailly « Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface ». Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2010.
- [25] Nichiporuk Oleksiy « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.
- [26] Dang Minh Trung « Elaboration de cellules solaires photovoltaïques a base de polymères conjugués, études des systèmes reticulables ». Thèse de doctorat, Université Bordeaux1, 2009.
- [27] R.Sridhar et al « Modeling of PV Array and Performance Enhancement by MPPT Algorithm ». International Journal of Computer Applications, Volume 7– No.5, 0975 – 8887 September 2010.
- [28] Kendouli F « Etat de l'art et modélisation des microcentrales ». Mémoire de magister En Electrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [29] A. Ould mohamed yahia et al « étude et modalisation d'un générateur photovoltaïque » revue des Energie Renouvelables Vol.11 N° 3 2008 pp 473-483, 2008.
- [30] R. Khezzar et al. « Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque ». revue des Energie Renouvelables Vol.13 N° 3, pp 379-388, 2010.
- [31] T.U. Townsend « A Method for Estimating the Long Term Performance of Direct-Coupled Photovoltaic Systems ». MS Thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1989.
- [32] O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed « Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models » 7th International ELECTRIMACS Congress, Montréal, Août 2002.

- [33] G. Notton et al. « Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin ». *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 13 N°1, pp 49-62, 2010.
- [34] J.A. Gow and C.D. Manning « Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power Electronics Simulation Studies ». *IEE Proceedings on Electric Power Applications*, Vol. 146, N°2, pp. 193 - 200, 1999.
- [35] 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.
- [36] L.A. Hecktheuer, A. Krenzinger and C.W.M. Prieb « Methodology for Photovoltaic Modules Characterization and Shading Effects Analysis ». *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, Vol. 24, N°1, pp. 26-32, 2002.
- [37] Nikhil J.Anthony « Thermal analysis of a solar water distillation and electricity generation system ». A Thesis submitted to the Department of Mechanical Engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science Degree Awarded: Fall Semester, 2008.
- [38] B Addallah « Développement de surface à base de dioxyde de titane par PVD pour une application aux cellules solaires ». Thèse de doctorat, Université de Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2008.
- [39] R. Merahi, R. Chenni, M. Houbes « Modélisation et Simulation d'un Module PV par Matlab » *Journal of Scientific Research* N° 0 vol 1, 2010.
- [40] Adel et Shahat « PV cell module modeling and simulation for smart grid applications » *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, JATIT All rights reserved, pp 9-20, 2010.
- [41] Akihiro Oi « Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System». PhD Thesis Presented to the Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2005.
- [42] Liu S, Dougal RA « Dynamic multiphysics model for solar array ». *IEEE Trans Energy Convers*, vol 17.N° 2:pp. 285–294, 2002.
- [43] E. Karatepe, M. Boztepe and M. Colak « Neural Network Based Solar-Cell Model ». *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, N°9-10, pp. 1159-1178, 2006.
- [44] W. De Soto, S.A. Klein, W.A. Beckman « Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance ». *Solar Energy* 80, pp. 78-88, 2006.

- [45] K.H. Hussein I. Muta T. Hoshino M.Osakada « Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions ». IEE Proc-Gener. Trans. Distrib, Vol. 142, No. 1, pp 59-64 January 1995.
- [46] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, Ernesto Ruppert Filho « Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays ». 10th Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), 2009.
- [47] Salima. Kebaili. Achour. Betka « Efficiency Model Of DC/DC PWM Converter Photovoltaic Applications ». GCREEDER, Amman-Jordan, March 31st – April 2nd, pp1-5, 2009.
- [48] Akassewa Tchapo SINGO « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome ». Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [49] M. Belhadj et al. « Estimation de la puissance maximale produite par un générateur photovoltaïque ». Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°2, pp 257-264, 2010.
- [50] L. Lu, H.X. Yang « Environmental payback time analysis of a roof-mounted building-integrated photovoltaic (BIPV) system in Hong Kong ». Applied Energy 87, pp 3625-3631, 2010.
- [51] Fung Yu Yan « Energy performance of semi-transparent PV modules for application in buildings ». Ph.D Thesis, The Hong Kong Polytechnic University, 2006.
- [52] Lin Lu « Investigation on Characteristics and Application of Hybrid Solar/Wind Power Generation Systems ». Ph.D Thesis, The Hong Kong Polytechnic University, 2004.
- [53] Hassini H « modélisation, optimisation d'un système hybride éolien- photovoltaïque ». Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2010.
- [54] Hossein Kord, Ahmad Rohani « An Integrated Hybrid Power Supply for Off-Grid Applications Fed by Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Energy Systems ». 24th International Power System Conference, Iran, 2009.

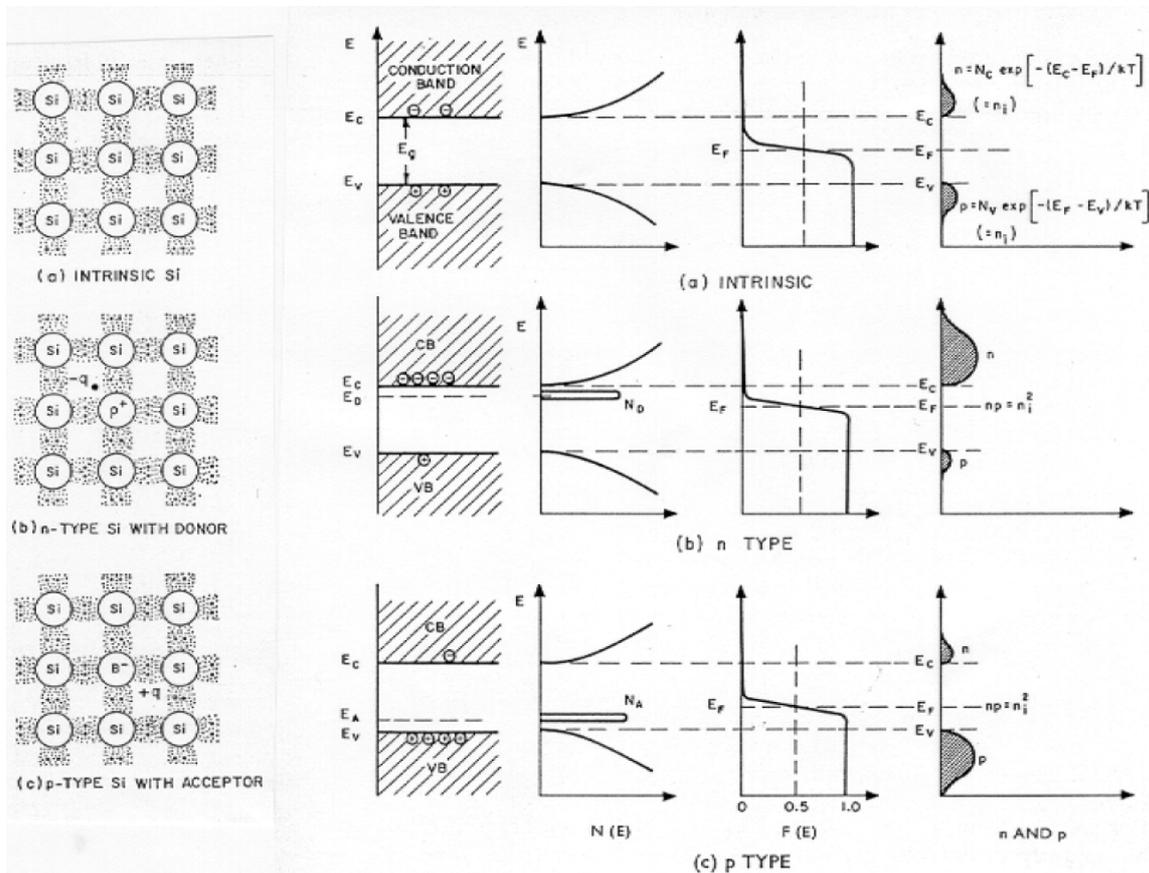
Annexe 2

Exemple de chaîne de production de cellules photovoltaïques en silicium

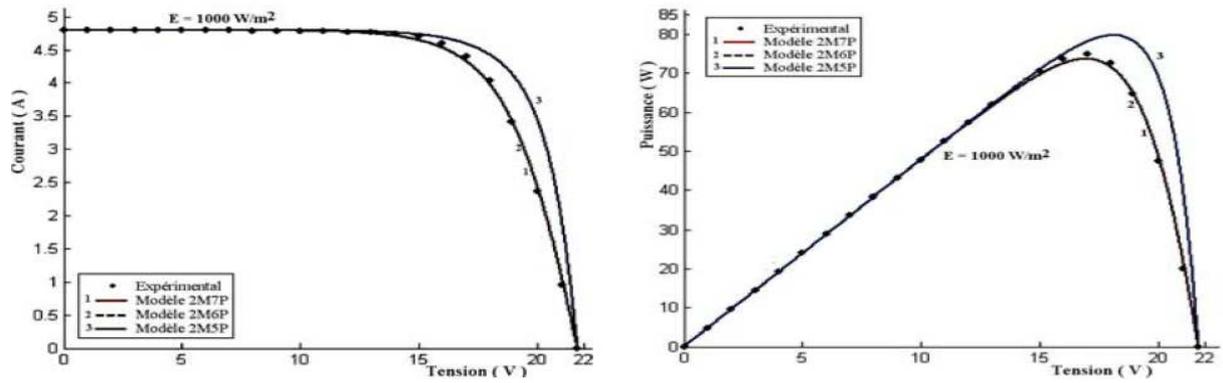


Exemple de chaîne de production de cellules photovoltaïques en silicium.

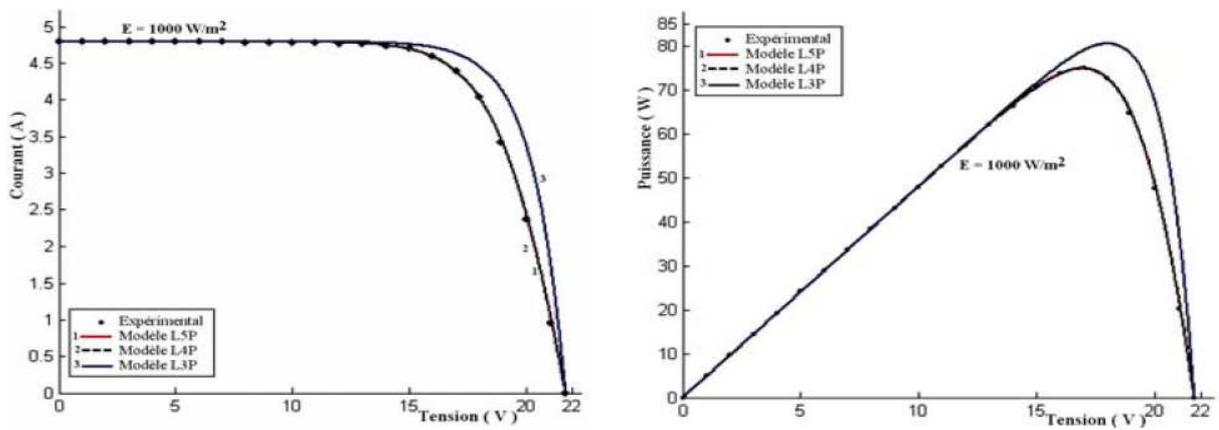
Méthode graphique de détermination du niveau de Fermi d'un semi-conducteur (d'après Shockley, Electrons and holes in semiconductors, van Nostrand, Princeton, 1950).



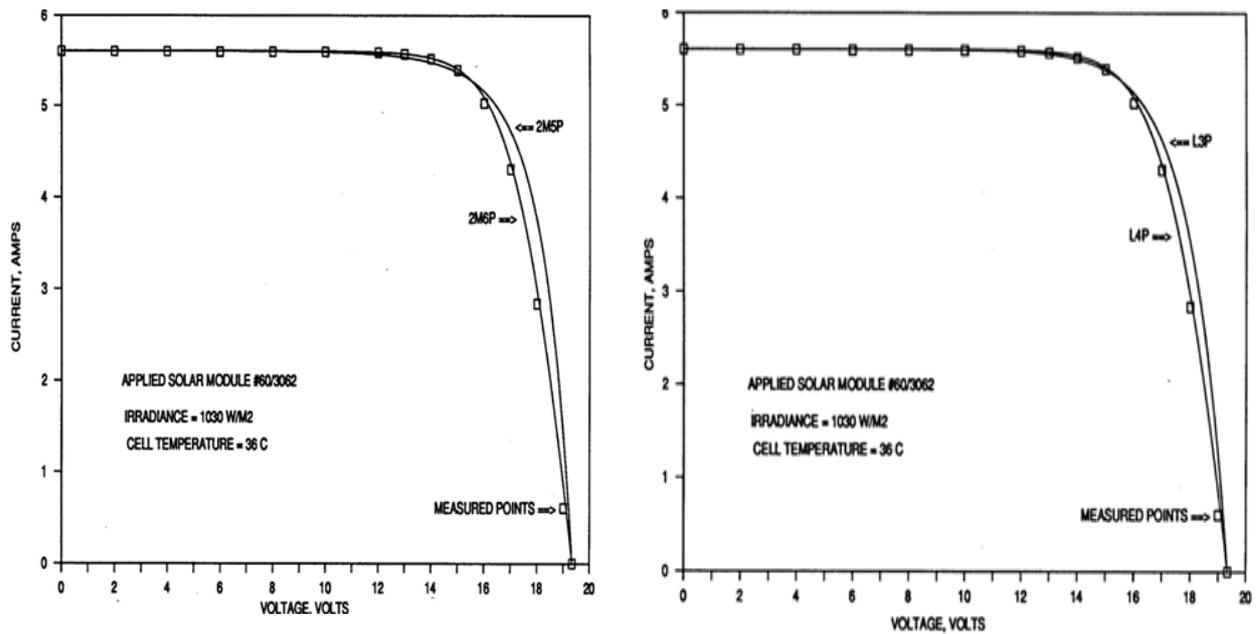
Annexe 3



Caractéristiques I(V) et P(V) pour les modèles à deux exponentielles [30]



Caractéristiques I(V) et P(V) pour les modèles à une exponentielles [30]



Caractéristiques I(V) pour les modèles à une exponentielles à deux exponentielles [31]

Résumé : L'utilisation des énergies renouvelables a connu ces dernières années un développement considérable. L'élément de base de cette énergie est la cellule photovoltaïque qui a été l'objet de plusieurs recherches dans plusieurs laboratoires de recherche.

En effet, plusieurs modèles de la cellule ont été développés et rapportés dans la littérature spécialisée. De plus, plusieurs modèles calculant la puissance fournie par cette cellule sont disponibles.

Le but du travail présenté dans ce mémoire de magister se résume en deux points :

Etude comparative des plusieurs modèles caractérisant la cellule photovoltaïque et l'influence des paramètres extérieurs telles que, la température et l'irradiation.

Etude comparative des plusieurs modèles qui permettent de calculer la puissance fournie par photopile.

Mots-clés : Cellule photovoltaïque, Modèles, Puissance photovoltaïque.