

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département des Sciences et Technologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique

Par : CHAMKHA Tahar

Thème

***MODELISATION ET SIMULATION D'UN GENERATEUR
PHOTOVOLTAÏQUE***

Soutenu publiquement le : 26/05/2016

Devant le jury :

DJELLOULI Abdelkader	MAA	Univ. Ghardaïa	Président
BEN YELLOUL Kamel	MRA	URAER. Ghardaïa	Examinateur
FERKOUS Khaled	MAA	Univ. Ghardaïa	Examinateur
BAHRI Ahmed	MAA	Univ. Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2015/2016

Remerciements

Avant tout je tiens mes remerciements à ***Allah*** qui m'a donné la force, le courage et m'a protégé et permis de succéder dans ma vie.

A la suite je remercie vivement à mon encadreur ***Mr. BAHRI Ahmed*** Maître assistant à l'université de Ghardaïa qui a fourni des efforts énormes, *par ses Informations ses* bons conseils, ses bonnes orientations et ses encouragements durant la préparation du thème.

Mes vifs remerciements également aux membres du jury Mr. ***DJALLOUL Abdelkader*** maître assistant à l'université de Ghardaïa, Mr. ***BEN YALLOUL Kamel*** maître assistant à l'université de Ghardaïa et Mr. ***FERKOUS Khaled*** maître assistant à l'université de Ghardaïa qui ont eu la disponibilité et la bonne volonté pour examiner mon travail ainsi que pour évaluer sa valeur scientifique.

Je tiens à remercier toute ma famille pour son soutien moral durant toute la période de la préparation du diplôme du master 2.

Je remercie également tous mes collègues de travail qui m'ont apporté leur soutien et leur encouragement pour l'accomplissement de ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements et ma profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail, je tiens vivement à leur dire merci.

Merci à tous.

Tahar

DÉDICACES

A L'ÂME DE MON CHER PÈRE ET À MA TRÈS CHÈRE MÈRE
POUR LEURS SOUTIEN ET ENCOURAGEMENTS DANS CETTE
VIE, À MON CHER FILS **ABDELBARI** QUE DIEU ME LE
GARDE, À MES PROCHES ET TOUTE MA PETITE ET
GRANDE FAMILLE, À MES AMIS ET TOUS LES GENS QUI
M'AIMENT, TOUS CEUX QUI SONT PROCHES DE MON CŒUR
ET DONT JE N'AI PAS CITÉ LES NOMS. AU BONHEUR DES
PLUS CHERS, À TOUTES LES PERSONNES QUI CONNAISSENT
TAHAR DE PRÈS OU DE LOIN, JE DÉDIE CE MODESTE
TRAVAIL.

ملخص

طشا ألهِخ انطبِقخ انكهِشْتِيخ، ونضَبُ اسرُشاسز هب واكزُبد اُرْبِهب زبِنب گهي يُنِغ رِقِهْدُخ وِبِاد قِبْتِهخ نِهْبِد يِهْتِخ نِهْجِخ، كَبُ يِ انضشوسِي انجسث كِبُ يصبِيس نُدُهخ رَضُ اُرْبِج كِبُ يِ هز انطبِقخ انسِيخ ونُدُو اَقْطِيع والَ صِة يَم طبِقخ انشُر، اَنْبِء، انشُس... انخ.

يِ أهي هز انطبِقِد انزِدَدِخ دَد انطبِقخ انشِيخ وه الأوسغ اُرشِيسا والْكَتْش اسزِگِبال نُب نِهْب يِ خصبِنص ويضابُ خبصخ اردبِ انجِخ زِث ال اَنْبِس سهجِخ نِهْب گهي هز الِجِشِخ.

هز انزِكشِخ رُزِبول زَخخ ويسبِكِج يِنذ كِهش وضِيُ يِرْثَم فَ خِهخ كِهش وضِنِخ، أو نذ كِهش وضِيُ وسنط انكِبِصش سِءا گهي انزِسهِم أو انزِفسِخ

زست انسِبخ ورنكُ ثبِسزِگِبال تشبِيح اَنْبِراالَه/زَخخ زِث اَشابُ وثبِسزِگِبال هزا انجِشِيح رُثَم يسبِكِزُ كَجِبسِح كِبُ سنط نُدُگِخ انشِيبِص انشِيبِخ انخِدِخ

ثبِنجِشِيح ورنكُ نرُثَم اَنْكِبِديخ انزُ رشِط رِبِس انخِشِج ثبِنزِبرش وكزا انكِالفِخ تِ اسزِطِبِخ اَنْنذ انكِهشِوضِيُ ثبِنزِبرش اَنْبِرح.

تفضم هزا انكِم قُب تِكَم رطِجُ ورنكُ تِدِساسِخ واسزِخشِاج انزِبنِج ثبِسزِگِبال يِكْطِيد فِكْهخ يِ يسطِخ رِنذ انطبِقخ انكِهشْتِيخ ثاسطِخ انطبِقخ انشِيخ

انزِباذِخ تَطِقِخ واد نشو بوالِية بغيرِداية ويقبِسِخ هز انزِبنِج ثبِنزِبنِج انكِطِيبِخ ثاسطِخ صِنِغ الندا اَنْسزِگِهخ فَ اَنْفِغ ورنكُ يِ صاُوخ رَأِيش انشِاسِح

والِضِبِء ح گهي سِش انهزِيد انشِيخ ورنكُ تَأخز انقِي انزِدشِج اَنْسدهخ بو 2012/02/22 وكبذ انزِبنِج خذ يزقبِسِنخ وككسذ يب رُبونب يِ يفبهي طَشِخ

خالل دِساسزُب.

كلمات مفتاحية: فِرِيفنْزِبُ كِ، اِنْ زَخخ، اَنْسِكِج، نذ شُس، بِبرالَه/بِن كِ، يِنذ شُس.

Résumé

Vu l'importance de l'énergie électrique et pour faire face à l'épuisement inévitable au futur des sources classiques de cette produit stratégique, il est nécessaire et exigé de rechercher des autres sources alternatives, comme les énergies renouvelables, parmi lesquels l'énergie solaire qui est l'énergie la plus utilisée à cause de ses nombreuses applications et ses avantages vis-à-vis l'environnement.

Ce mémoire présente une modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque par l'environnement Matlab/Simulink où nous avons préparé un schéma bloc standard en utilisant les symboles mathématiques de base existant dans la bibliothèque du Simulink pour simuler tous les cas possibles de raccordement soit en série, en parallèle ou montage mixte des cellules, modules, panneaux ou champs photovoltaïques pour produire une puissance électrique selon notre besoin.

Grâce à ce bloc de simulation, nous avons fait un travail pratique de comparaison entre des résultats pratiques ramenés à partir de la centrale photovoltaïque de **Oued Nechou à Ghardaia** où nous avons comparé les résultats obtenus par les donnée pratiques par ceux présentés par le constructeur de cette centrale PV d'un point de vu influence de la température et l'ensoleillement sur les caractéristiques des panneaux PV tel que nous avons trouvé résultats en accord avec ceux affichés par le constructeur de cette centrale PV ainsi que avec les données enregistré au niveaux du site concerné le **24/04/2016**.

Mots clés : Photovoltaïque, modélisation, simulation, cellule PV, module PV, Matlab/Simulink, Générateur PV.

Abstract

Renewable energy is generally defined as energy that is collected from resources which are naturally replenished on a human timescale. There are many forms of renewable energy. Most of these renewable energies depend in one way or another on sunlight.

Given the importance of electric power and to deal with its inevitable exhaustion in future conventional sources of this strategic product is necessary and required to search

This work presents a modelling and simulation of a photovoltaic generator (cell or module) using the software Matlab/Simulink for studying the $I_{pv}(V_{pv})$ and $P_{pv}(V_{pv})$ characteristics, where we have prepared a standard block diagram to simulate all possible cases connection of cells, modules, panels or fields photovoltaic to produce a desired power.

Using of the block simulation, we did a practical work by comparing results obtained from the site photovoltaic of **Oued Nechou** of **Ghardaia** where we compared the results obtained by the practices given by the manufacturer of the plant a point of view influence of temperature and illumination on the performances of PV panels. Finally, we found our results agree with those displayed by the manufacturer of the PV site power plant and with the data recorded at the level of the site on 24th of April 2016.

Keys words: Photovoltaic, modelling, simulation, cell PV, module PV, Matlab/Simulink, photovoltaic Generator.

LISTE DES FIGURES

N° de figure	Dénominations	Page
Fig.1.1	Production de l'électricité dans le monde en 2013 par source.	3
Fig.1.2	Principe de chauffe-eau thermo-solaire.	4
Fig.1.3	Principe de la réfrigération par absorption	6
Fig.1.4	Fonctionnement d'une Centrale Thermo-Solaire	6
Fig.1.5	Géothermie à basse énergie pour chauffage d'une maison.	8
Fig.1.6	Demande nationale en électricité sur réseau interconnecté à (2014).	9
Fig.1.7	Principe de l'effet photovoltaïque.	10
Fig.1.8	Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique	12
Fig.1.9	Fonctionnement d'une centrale éolienne	12
Fig.1.10	L'énergie éolienne installée dans le monde entre 2000-2013	13
Fig.1.11	L'énergie renouvelable en Algérie horizon 2030.	14
Fig.1.12	Carte d'ensoleillement en Algérie.	15
Fig.2.1	Interactions entre le rayonnement solaire et les milieux naturels.	21
Fig.2.2	Spectre du rayonnement solaire.	22
Fig.2.3	Définition du nombre de masse d'air en (terre plate).	22
Fig.2.4	Coordonnées Géographiques d'un point de la terre.	25
	VI	
Fig.2.5	Coordonnées horaires d'un point A sur la surface de la terre	26
Fig.2.6	Repère équatorial.	28
Fig.2.7	Repère horizontal	29
Fig.2.8	Appareil de mesure rayonnement solaire Pyranomètre	30
Fig.2.9	Evolution de la production d'électricité mondiale par PV	32
Fig.2.10	Structure d'une cellule Photovoltaïque.	33
Fig.2.11	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	33

Fig.2.12	Photos de cellules monocristalline (a) et Polycristaline (b).	34
Fig.2.13	Schéma équivalent électrique de la cellule PV.	35
Fig.2.14	Présentation générale d'une cellule PV.	36
Fig.2.15	Caractéristiques d'une cellule PV.	37
Fig.2.16	Panneaux photovoltaïques.	39
Fig.2.17	Boîte de raccordement pour regroupement des modules PV.	40
Fig.3.1	De cellule au champ photovoltaïque.	43
Fig.3.2	Association des cellules en série.	44
Fig.3.3	Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ des cellules en Série.	44
Fig.3.4	Association des cellules en parallèle.	45
Fig.3.5	Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ des cellules en parallèle	45
Fig.3.6	Les deux type de protection des installations PV	46
Fig.3.7	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	48
Fig.3.8	Modèle simple d'un GPV	49
Fig.3.9	Modèle simple d'un PV avec une résistance en parallèle.	50
Fig.3.10	Modèle simple d'un PV avec une résistance en parallèle.	50
Fig.3.11	Modèle d'un GPV en présence de deux résistances R_p et R_s.	51
Fig.3.12	Influence de la température et l'éclairement sur la courbe $I_{pv}(V_{pv})$	53
Fig.3.13	Influence de la résistance série sur la courbes $I_{pv}(V_{pv})$.	54
Fig.3.14	Influence de la résistance parallèle sur les courbes $I_{pv}(V_{pv})$, $P_{pv}(V_{pv})$	55
Fig.3.15	Courbe d'un GPV sous effet d'ombrage avec des diodes by-pass.	56
Fig.3.16	Influence du courant de saturation sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$.	56
Fig.3.17	Influence du facteur d'idéalité sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$.	57
Fig.4.1	Circuit équivalent d'une cellule PV modèle avec une diode.	59
Fig.4.2	Schéma bloc de simulation d'u GPV sous Matlab/Simulink.	61
Fig.4.3	Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV.	62

Fig.4.4	P(V_{pv}) d'une cellule PV.	62
Fig.4.5	Effet de la température sur la courbe I_{pv}(V_{pv}) d'une cellule PV.	64
Fig.4.6	Effet de la température sur la courbe P_{pv}(V_{pv}) d'une cellule PV.	64
Fig.4.7	Effet de l'éclairement sur la courbe I_{pv}(V_{pv}) d'une cellule PV.	65
Fig.4.8	Effet de l'éclairement sur la courbe P_{pv}(V_{pv}) d'une cellule PV.	66
Fig.4.9	Effet de R_s sur la courbe I_{pv}(V_{pv}) d'une cellule PV.	67
Fig.4.10	Effet de R_s sur la courbe P_{pv}(V_{pv}) d'une cellule PV.	67
Fig.4.11	Effet du Facteur d'idéalité sur la courbe I_{pv}(V_{pv}) d'une cellule PV.	68
Fig.4.12	Effet du Facteur d'idéalité sur la courbe P_{pv}(V_{pv}) d'une cellule PV.	68
Fig.4.13	Effet de la résistance shunt sur I_{pv}(V_{pv}) d'une cellule PV.	69
Fig.4.14	Effet de la résistance R_p sur la courbe P_{pv}(V_{pv}) d'une cellule PV.	69
Fig.4.15	Caractéristique I_{pv}(V_{pv}) d'un module PV, N_s=36 et N_s=18.	71
Fig.4.16	Caractéristique P_{pv}(V_{pv}) d'un module PV, N_s=36 et N_s=18.	71
Fig.4.17	Courbes I_{pv}(V_{pv}) d'un module N_s=36, N_s=18 sous différentes T.	72
Fig.4.18	Courbes P_{pv}(V_{pv}) d'un module N_s=36 et N_s=18 sous différentes T	72
Fig.4.19	Courbes I_{pv}(V_{pv}) d'un module PV sous différents E N_s=36 et N_s=18	73
Fig.4.20	Courbes P_{pv}(V_{pv}) d'un module PV sous différentes E N_s=36, N_s=18	74
Fig.4.21	Influence de R_s sur la courbe I_{pv}(V_{pv}) d'un module N_s=36N_s=18.	74
Fig.4.22	Influence de R_s sur la courbe P_{pv}(V_{pv}) d'un module N_s=36 N_s=18.	75
Fig.4.23	Influence du A sur I_{pv}(V_{pv}) d'un module avec N_s=36 et N_s=18.	75
Fig.4.24	Influence du A sur P_{pv}(V_{pv}) d'un module N_s=36 et N_s=18.	76
Fig.4.25	Influence de R_p sur I_{pv}(V_{pv}) d'un module PV avec N_s=36 et N_s=18.	76
Fig.4.26	Influence R_p sur P_{pv}(V_{pv}) d'un module PV avec N_s=36 et N_s=18.	77
Fig.4.27	Courbes de puissance maximale expérimentale et simulée.	79
Fig.4.28	Variation de E et I_m pendant la journée du test.	80
Fig.4.29	Variation de tension V_m en fonction de température T	81

Fig.4.30	Variation du courant I_m en fonction de l'éclairement E.	81
Fig.4.31	Courbe $I_{pv}(V_{pv})$ de simulation pour (975 W/m², 25.41).	82

LISTE DES TABLEAUX

N° Tableau	Dénomination	Page
Tab.1.1	Caractéristique de quelques sources thermales, Nord d'Algérie.	16
Tab.2.1	Fiche D'identité du soleil.	20
Tab.2.2	Histoire du développement de la photovoltaïque.	31
Tab.3.1	Caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque.	47
Tab.4.1	Caractéristiques électriques du module PV.	70
Tab.4.2	Spécifications du module PV utilisés pour essais expérimentaux.	79
Tab.4.3	Comparaison des paramètres de performances réels et simulés	83

LISTE DES SYMBOLES

Le tableau suivant représente les symboles des grandeurs et leurs unités correspondantes utilisés le long de ce travail.

Symbole	Dénomination	Unité
A	Facteur d'idéalité de la diode.	-
Q	Flux de chaleur.	$W.m^{-1}.C^{-1}$
λ	Conductivité thermique du milieu.	$W.m^{-1}.C^{-1}$
λ'	Longueur d'onde de la lumière	m
$^{\circ}C$	Degré Celsius.	$^{\circ}C$
%	Pourcentage.	%
Cos	Cosinus.	-
E_{λ}	Emittance énergétique monochromatique.	$W.m^2$
E	Eclairement solaire.	W/m^2
Φ	Flux énergétique (la puissance rayonnée par la source).	W
H	Angle horaire du soleil.	$^{\circ}$
h	Constant de Blanck.	-
c	Vitesse de la lumière dans le vide	$m.s^{-1}$
ν	Fréquence horaire.	HZ
δ	Déclinaison du soleil par rapport du plan équatorial	$^{\circ}$
j	Numéro du jour.	-
ω	Angle du jour de l'année.	$^{\circ}$
I_{pv}	Le courant électrique de sortie.	A
V_{pv}	La tension de sortie d'un générateur ou champ PV.	V
I_{ph}	Courant-photon.	A
I_0	Courant de saturation.	A

I_{sr}	Courant de saturation réversible.	A
I_{cc}	Courant de court-circuit.	A
$I_{pv}(V_{pv})$	Courant de sortie photovoltaïque	A
$P_{vp}(V_{pv})$	Puissance délivrée par le générateur PV en fonction.	W
V_{co}	Tension de circuit ouvert.	V
ΔV	Chute de tension.	V
R_S	Résistance série.	Ω
R_p	Résistance parallèle.	Ω
N_s	N cellules ou de modules identiques en série.	-
N_p	N cellules ou de modules identiques en parallèle.	-
K	Constant de Boltzman.	-
R_0	Résistance interne de la diode.	Ω
A	Section de cellule.	m^2
m/s	Mètre par seconde.	-
ac	Le potentiel thermique.	-
η	Le rendement de conversion photovoltaïque.	$^\circ C$
FF	Facteur de forme.	%
Ω	Symbole de l'unité de mesure d'une résistance.	-
θ	Angle d'incidence des rayonnements.	-
NH_3	Gaz ammoniac.	$^\circ$
H_2O	Molécule d'eau.	-
H_2	Gaz Hydrogène.	-
O_3	Gaz Ozone.	-
CO_3	Trioxyde de carbone.	-

LISTE DES ABREVIATIONS

Pour alléger et réduire le format du manuscrit et pour plus de clarté, nous allons faciliter la tâche au lecteur, par l'emploi des acronymes ou abréviations des mots courants (les plus utilisés) dans ce travail. Ces acronymes apparaissent dans l'ordre alphabétique dans le tableau suivant :

Abréviation	Dénomination
AM	Masse d'air
CA	Courant alternatif.
CC	Courant continu.
CDER	Centre d'énergie renouvelable.
CdTe	Tellurure de Cadimium.
Cosh	Cosinus hyperbolique.
D	Rayonnement direct.
Ect	Et cetera
Eg0	Energie de gap.
ENR	Energie renouvelable.
Fig	Figure.
GaAs	Arséniure de Galiume.
GPV	Générateur photovoltaïque
Grad	Gradient.
GWh	Gigawatt heure.
KWc	Kilo Watt crête (Puissance pour E= 1000 W/m ² , T=25°C).
m ²	Mètre carré

m/s	Mètre par second
MW	Mégawatt.
NaBr	Sodium brome.
P_{max}	Puissance maximale délivrée par le générateur.
P_{in}	Puissance incidente.
PSP	Bromure de polysulfure.
PV	Photovoltaïque.
REN21	Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.
SKTM	Shariket Kahraba wa Takat Motajadida (filiale de la Sonelgaz)
STC	Conditions Standards.
Sin	Sinus.
T	Température absolue de la cellule.
Tab	Tableau.
T_{ref}	Température dans les conditions normale en degré kelvin.
ZnBr	Zinc-brome.

SOMMAIRE

-	REMERCIEMENT.....	I
-	DÉDICACE.....	II
-	RÉSUMÉ EN ARABE.....	III
-	RÉSUMÉ EN FRANÇAIS.....	IV
-	RÉSUMÉ EN ANGLAIS.....	V
-	LISTE DES FIGURES.....	VI
-	LISTE DES TABLEAUX.....	VII
-	LISTE DES SYMBOLES.....	VIII
-	LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	IX
-	SOMMAIRE.....	X
-	INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1

CHAPITRE 1: ENERGIE RENOUVELABLE

1.1- INTRODUCTION.....	3
1.2- GENERATION D'ENERGIES RENOUVELABLES.....	3
1.2.1- Génération de la chaleur.....	4
1- Energie solaire thermique (Thermo solaire).....	4
2- Energie géothermie.....	6
3- Energie biomasse.....	8
1.2.2- Génération d'électricité.....	8
1- Energie Photovoltaïque.....	9
2- Energie hydraulique.....	11
3- Energie éolienne.....	12

1.3- EVALUATION DE L'ENERGIE RENOUVELABLE.....	13
1.3.1- Potentiel solaire.....	14
1.3.2- Potentiel éolien.....	15
1.3.3- Potentiel géothermique.....	15
1.3.4- Potentiel de l'hydroélectricité.....	16
1.3.5- Potentiel de la biomasse.....	17
1.4- AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES SOURCES ENR.....	17
1.4.1- Avantages des énergies renouvelables.....	17
1- Avantages sur le plan environnemental	17
2- Avantages sur le plan social.....	18
3- Avantages sur le plan économique.....	18
1.4.2- Inconvénients des énergies renouvelables.....	18
1.5- CONCLUSION.....	18

CHAPITRE 2: PRESENTATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

2.1- INTRODUCTION	19
2.2- POTENTIEL SOLAIRE.....	19
2.2.1- Carte d'Identité du Soleil	20
2.2.2- Rayonnements solaires.....	20
2.2.3- Rôle de l'atmosphère.....	21
2.2.4- Spectre solaire.....	21
2.2.5- Nombre de masse d'air.....	22
2.2.6- Constante Solaire.....	24
2.2.7- Dualité de la lumière.....	24
2.3- PARAMÈTRE DE POSITION D'UN POINT SUR LA TERRE	24

2.3.1- Cordonnées géographiques terrestres.....	24
2.3.2- Coordonnées Horaires terrestre.....	25
2.4- POSITION DU SOLEIL.....	26
2.5- DIFFERENTS TYPES DE RAYONNEMENT SOLAIRE.....	29
2.5.1- Rayonnement direct	29
2.5.2- Rayonnement diffus.....	29
2.5.3- L'albédo ou réfléchi.....	29
2.6-EFFETPHOTOVOLTAÏQUE.....	30
2.6.1- Histoire de la Photovoltaïque.....	30
2.6.2- Cellule photovoltaïque	32
2.6.3 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	33
2.6.4- Les filières technologiques.....	34
2.6.5- Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	35
2.6.6- Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	36
2.7- PANNEAU SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE.....	39
2.8- BOITE DE DERIVATION D'UN PANNEAU SOLAIRE PV.....	39
2.9- SYSTEME DE CONVERSION	40
2.10- SYSTÈME DE STOCKAGE	40
2.11- CARACTERISTIQUES PRINCIPALES D'UNE BATTERIE.....	41
2.12- CONCLUSION.....	42

CHAPITRE 3: MODELISATION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE

3.1- INTRODUCTION.....	43
3.2- GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE GPV.....	43
3.3- MONTAGE DES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES.....	44

3.3.1- Montage série des cellules PV.....	44
3.3.2- Montage parallèle des cellules PV.....	45
3.4- PROTECTION DES GPV.....	46
3.4.1- Diode Anti-Retour.....	46
3.4.2- Diode By-pass.....	46
3.5- CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES D'UN MODULE PV.....	47
3.6- MODELE D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE.....	47
3.6.1- Circuit équivalent et modèles mathématique.....	47
3.6.2- Courant d'un GPV.....	49
3.7- INFLUENCE DE PARAMETRES SUR $I_{pv}(V_{pv})$, $P_{vp}(V_{pv})$.....	53
3.7.1- Influence de la température et de l'éclairement sur la courbe $I_{pv}(V_{pv})$	53
3.7.2- Influence des résistances parasite (R_s et R_p sur la courbe $I_{pv}(V_{pv})$	54
3.7.3- Influence de l'ombrage sur la courbe $I_{pv}(V_{pv})$	56
3.7.4- Influence du courant de saturation et facteur d'idéalité sur la courbe $I_{pv}(V_{pv})$	56
3.7.5- Influence du facteur d'idéalité (A).....	57
3.8- CONCLUSION.....	57

CHAPITRE 4: RESULTATS DE SIMULATION

4.1- INTRODUCTION.....	58
4.2- MODELISATION DU GPV.....	59
4.3- CARACTERISTIQUE D'UNE CELLULE SOLAIRE.....	62
4.3.1- Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$	62
4.3.2- Caractéristique $P(V_{pv})$	62
4.4- EFFET DES PARAMETRES SUR LES COURBE D'UNE CELLULE	63
4.4.1- Effet de la température.....	64
4.4.2- Effet de l'éclairement.....	65

4.4.3- Effet de la résistance série R_s	66
4.4.4- Effet du facteur d'idéalité A	68
4.4.5- Effet de la fuite de la jonction P.N ou la résistance shunt.....	69
4.5- CARACTERISTIQUES D'UN MODULE SOLAIRE PV.....	70
4.5.1- Effet de la température.....	72
4.5.2- Effet de l'éclairement E	73
4.5.3- Effet de la résistance série R_s du GPV.....	74
4.5.4- Effet du facteur d'idéalité A du GPV.....	75
4.5.5- Effet de la résistance R_p du module PV.....	76
4.6- ESSAIS EXPERIMENTAUX.....	77
4.6.1- Données du constructeur.....	78
4.6.2- Spécifications techniques des modules PV par technologie installés au site	78
4.6.3- Présentation des résultats expérimentaux et commentaires.....	79
4.6.4- Calcul de FF et η	82
4.7- CONCLUSION.....	83
CONCLUSION GENERALE.....	85
ANNEXES (A) : SCHÉMA BLOC D'UNE CELLULE SOUS MATLAB/SIMULINK.	
ANNEXE (B) : SCHÉMA BLOC D'UN GPV SOUS MATLAB/SIMULINK.	
ANNEXE (C) : SCHÉMA SYNOPTIQUE DU SITE PV OUED NECHOU À GHARDAÏA.	
ANNEXE (D) : TABLEAUX DES MESURES EXPÉRIMENTALES.	
BIBLIOGRAPHIE.	

INTRODUCTION GENERALE

Une source d'énergie primaire est une forme d'énergie disponible dans la nature avant toute transformation. Si elle n'est pas utilisable directement, elle doit être transformée en une source d'énergie secondaire pour être utilisable et transformable facilement.

Dans le monde, il existe différentes sources d'énergie : les matières premières et les phénomènes naturels. Les premières fournissent les énergies dites fossiles (Pétrole, gaz, charbon,... etc) alors que les autres fournissent les énergies dites renouvelables (solaire, vent, biomasse...etc).

Aujourd'hui, la production d'énergie électrique est faite principalement à base d'énergies fossiles et de combustible d'origine nucléaire. La consommation excessive de ces énergies à cause de la croissance de la demande mondiale en énergie, a conduit à un épuisement de ces dernières et une pollution aggravée de l'environnement ainsi que de l'atmosphère. Etant donné que cette forme d'énergie couvre la plus grande partie de la production énergétique actuelle. Le plus grand défi consiste à trouver d'autres solutions pour prendre la relève et la contrainte est donc d'avoir des sources d'énergie économique, propre et durable, car la protection de l'environnement est devenue aussi un point très important. Le changement de la politique du monde vers une autre source d'énergie qui remplacerait les énergies fossiles est une obligation qui est imposée par les différentes fluctuations mondiales, tels que les changements climatiques, l'effet de serre, et l'instabilité des prix du pétrole.

La meilleure solution envisagée c'est l'utilisation des énergies renouvelables, telles que la production d'électricité par le vent et la transformation d'énergie solaire.

La technologie photovoltaïque est parmi les applications de l'énergie solaire où cette dernière est transformée directement en énergie électrique par le biais d'un élément de base de cette technologie appelée cellule photovoltaïque. L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou le germanium. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie d'éclairement solaire. C'est l'effet photovoltaïque.

Dans ce travail, nous commençons tout d'abord par une présentation de la majorité des énergies renouvelables et leurs applications dans le domaine de la production de l'énergie électrique. Aussi nous citerons quelques statistiques énergétiques dans le territoire national et mondial.

Dans le 2^{ème} chapitre, nous prenons les notions principales sur le gisement solaire et l'importance de

ce dernier sur le rendement de la production de l'électricité, puis nous citons les modèles mathématiques qui nous aider à étudier un système PV dans une région ayant des caractéristiques appropriées. Ensuite nous rappellerons le principe de la conversion photovoltaïque, le fonctionnement d'une cellule et la constitution d'un GPV à partir de la cellule photovoltaïque qui représente l'élément de base de la construction d'un GPV.

Le 3^{ème} chapitre, est consacré à la modélisation mathématique sous forme d'une formule reliant le courant à la tension de sortie et la puissance en fonction de tension du GPV.

Le quatrième chapitre présente l'étude par simulation des caractéristiques et de la performance d'un système générateur photovoltaïque en utilisant Matlab /Simulink, où nous présenterons les simulations des caractéristiques courant-tension, puissance-tension du GPV en fonction des paramètres météorologiques (température et ensoleillement), et l'influence des différents éléments constituant notre GPV comme N_s , N_p , R_s , R_p ainsi que le type d'association des cellules en série ou en parallèle.

Dans la deuxième partie du quatrième chapitre nous discuterons nos résultats de simulations qui sont présentés sous forme des graphes.

À la fin de notre travail, nous allons faire une partie expérimentale qui consiste à une comparaison entre les résultats extraits à partir des mesures effectuées au niveau du site PV de oued Nechou à Gharadaia et l'utilisation de notre schéma bloc de simulation préparé à l'aide de l'environnement Matlab/Simulink en utilisant la technologie monocristalline pour le cas des panneaux fixe et panneaux motorisés.

1. ENERGIES RENOUVELABLES

1.1- INTRODUCTION.

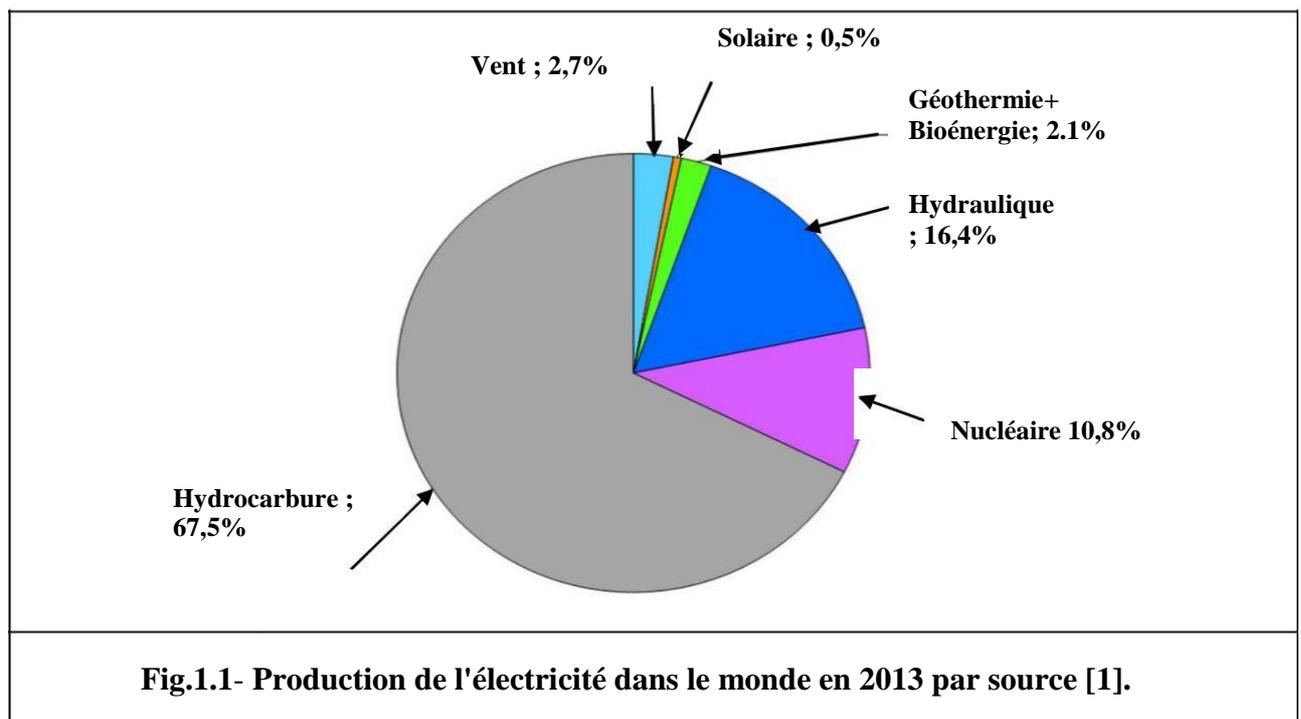
On appelle énergie renouvelable, si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future, c'est le cas d'énergie du soleil, du vent, du cours d'eau ...ect.

L'utilisation des énergies renouvelable n'est pas nouvelle, elles ont été utilisées depuis l'aube de l'humanité (bois de feu, moulin à vent, bateau à voile...).

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux différentes énergies renouvelables et leurs applications dans les domaines de production des différentes énergies et surtout de l'électricité. Afin d'exploiter au mieux ressources énergétiques pour tout projet ou étude des installations liées à l'énergie renouvelable, il est nécessaire de présenter quelques notions, applications et statistiques sur ces énergies.

1.2- GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES.

Les ressources d'énergies renouvelables comprennent la biomasse, le rayonnement solaire, le vent, l'hydroélectricité et la géothermie, chacune selon son domaine d'utilisation. A partir de l'énergie renouvelable on peut générer deux formes de l'énergie, l'une sous forme d'une chaleur et l'autre sous forme de l'électricité. La figue ci-dessous représente la consommation mondiale d'énergie primaire en 2013 [1].



1.2.1 Génération de la chaleur.

La plupart du temps, l'électricité est produite à partir d'une source de chaleur, en utilisant la vapeur d'eau comme caloporteur d'énergie. La vapeur fait tourner des turbines qui sont couplées à des générateurs électriques. La vapeur peut être produite en utilisant la plupart des sources d'énergie.

1- Energie solaire thermique (Thermo solaire).

L'énergie solaire thermique c'est la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. La production de cette énergie peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) où indirectement (production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique). L'énergie solaire thermodynamique est une technologie permettant l'exploitation des rayons du soleil pour produire de la chaleur [2].

L'utilisation de l'énergie solaire thermique est de nombreuses applications telles qu'on peut citer :

➤ Production d'eau chaude.

Le système de panneau solaire thermique consiste à chauffer de l'eau à partir de l'énergie solaire. Les capteurs solaires thermiques sont considérés comme un moyen efficace pour récupérer l'énergie solaire. Un large spectre d'application en découle : production d'eau chaude sanitaire, production de chaleur en masse pour l'industrie, désaliénation d'eau de mer ou encore production de thermoélectricité [3].

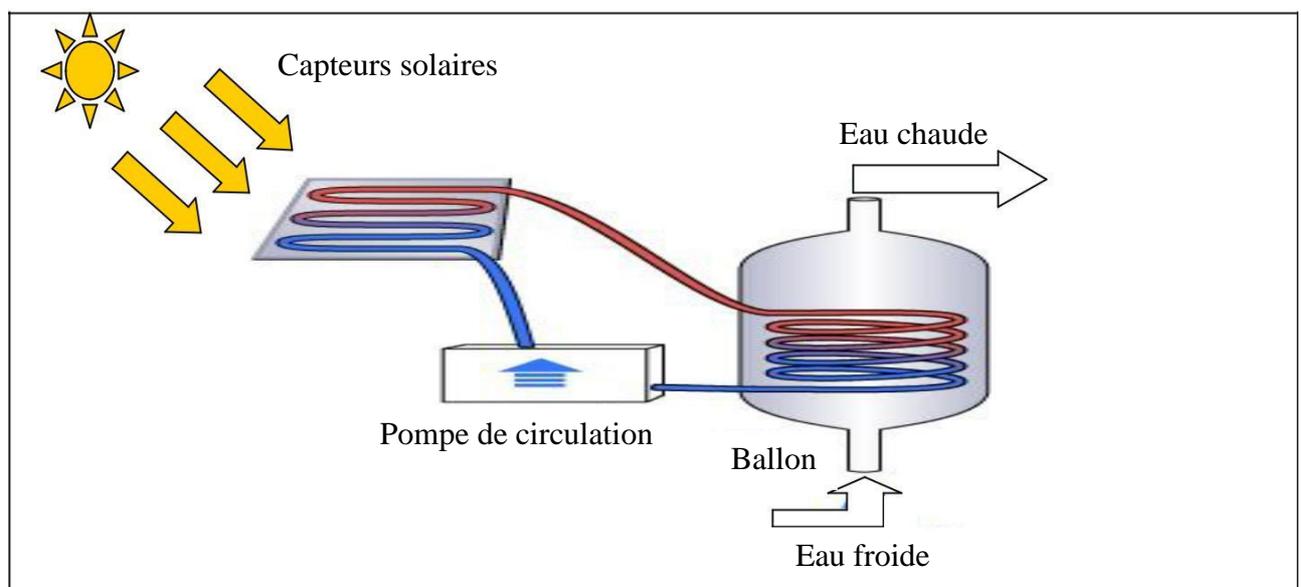


Fig.1.2- Principe de chauffe-eau thermo-solaire

➤ **Chauffage des maisons.**

Lorsque l'eau est chaude, le liquide est transporté vers un ballon échangeur, qui transfère la chaleur au réseau d'eau chaude de chauffage. Une fois refroidi, le liquide retourne vers les panneaux pour être réchauffé.

➤ **Chauffage de l'eau des piscines.**

Le chauffage des piscines se présente sous forme de capteurs solaires à dérouler sur une surface plane, non loin de la piscine. L'eau est réchauffée en absorbant la chaleur stockée dans les capteurs. Ces capteurs sont utilisés pour le chauffage des piscines en été et assurent des températures relativement basses de l'ordre de 30 à 35°C [14].

➤ **Séchage thermo solaire.**

Le séchage est une étape cruciale et indispensable dans le processus de conservation des matières telles que les denrées agroalimentaires, le fourrage animal, les céréales ou le bois. Le séchage solaire permet à la fois de respecter l'environnement et d'améliorer la qualité des productions [4]. Le séchage fait appel aux trois modes de transfert de chaleur par conduction, par convection et par rayonnement, ainsi que le transfert de matière [5].

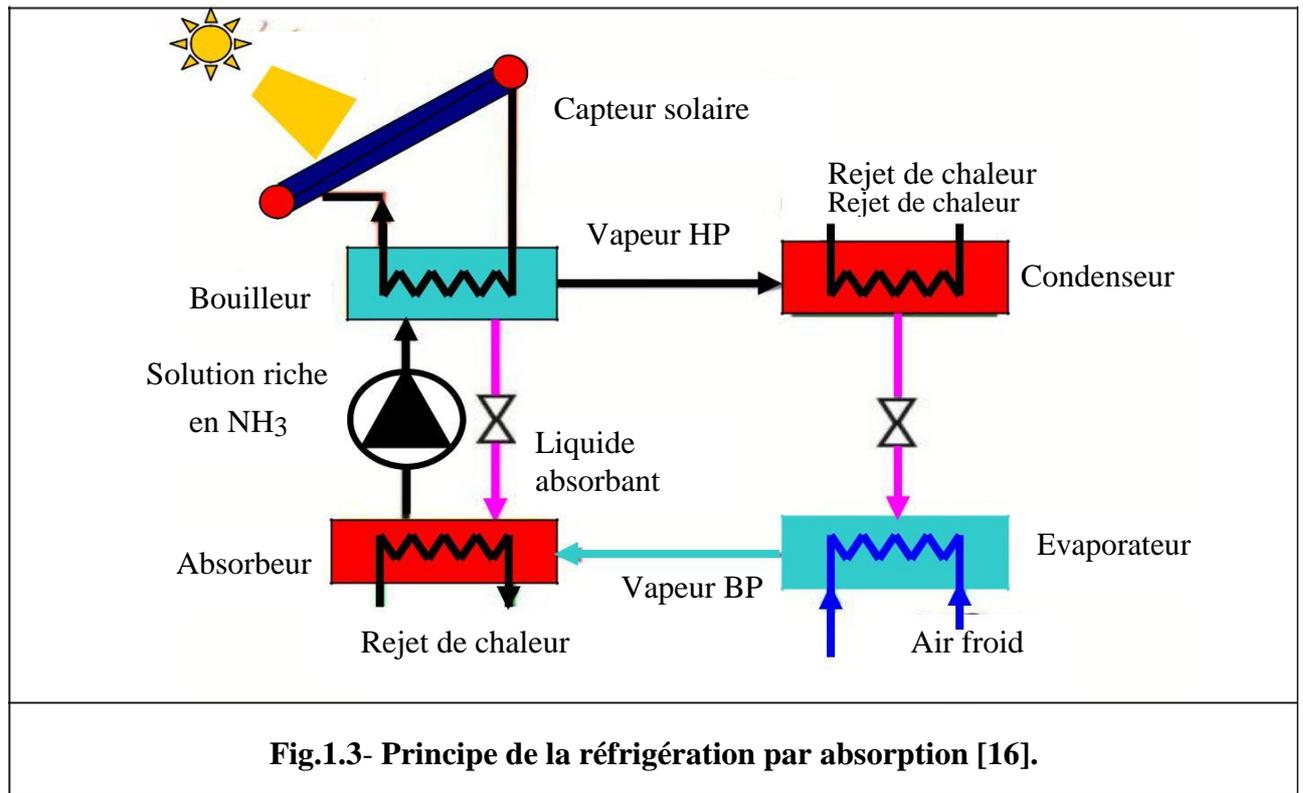
➤ **Réfrigération par absorption.**

Les systèmes de réfrigération à sorption (absorption et/ou adsorption) représentent une alternative intéressante dans ce cadre. Les fluides utilisés habituellement par ces systèmes sont relativement bénins pour l'environnement que ce soit l'ammoniac, l'eau ou les alcools [6].

Le système est composé des éléments suivants:

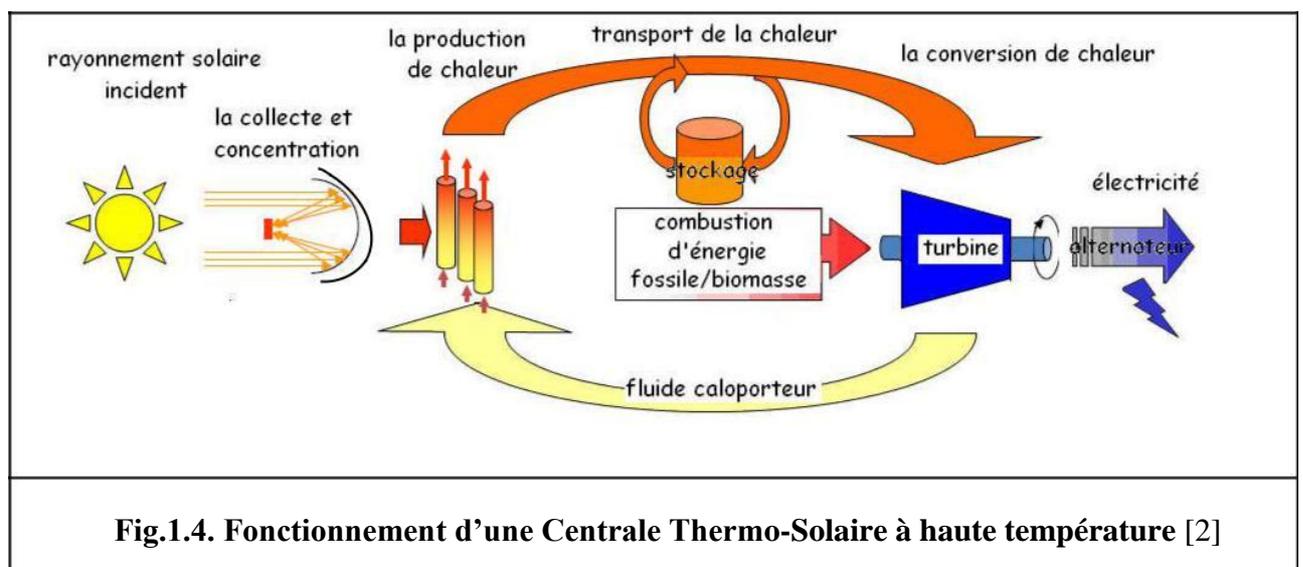
- √ Un bouilleur: la solution réfrigérant/absorbant est chauffée par l'énergie solaire, le réfrigérant s'évapore sous une pression élevée.
- √ Un condenseur: le réfrigérant y perd de la chaleur
- √ Un détendeur: le fluide réfrigérant voit sa pression baissée avant de passer à l'évaporateur.
- √ Un évaporateur: le réfrigérant une fois à basse pression est absorbée dans la solution appauvrie en provenance du bouilleur.

√ Une pompe: la solution enrichie en réfrigérant est transportée jusqu'au bouilleur.



➤ **Production de très haute température.**

La concentration du rayonnement solaire sur une surface de captage permet d’obtenir de très hautes températures comprises entre 400 °C et 1000 °C. La chaleur solaire produit de la vapeur qui alimente une turbine qui alimente elle-même un alternateur pour produire de l’électricité [7].



2- Energie géothermie

La géothermie s'intéresse à l'exploitation des sources d'eau chaude en profondeur. Elle constitue l'une des principales ressources d'énergie renouvelable dans le monde. Il existe à travers le monde deux types principaux de géothermie [7]:

➤ **La géothermie haute énergie:** Elle concerne les gisements des zones continentales actives qui se caractérisent par des températures supérieures à 150 °C. Elle est destinée principalement à la production d'électricité [8].

➤ **La géothermie basse énergie:** Elle concerne les gisements des zones des plates formes continentales stables, recouvertes de terrains sédimentaires caractérisées par une température comprise entre 30 °C et 150 °C. Elle est destinée principalement au chauffage urbain et au chauffage de serres [8].

Si on prend le cas d'Algérie, les études en géothermie sur le Nord algérien, (faites en 1988) montrent que le Nord de l'Algérie compte un nombre important de sources thermales tel que on a près de 200 sources ont été inventoriées et elles sont réparties à travers tout le territoire Nord algérien, majoritaires au Nord-est [10].

→

La géothermie se caractérise essentiellement par [10] :

√ Le gradient géothermique: C'est la variation de température en fonction de la profondeur. La valeur normale est de 30 C /100 m néanmoins certaines régions enregistrent 100 0C/100 m comme c'est le cas à Larderello (Italie) alors que des sites ne dépassent pas 1 °C/100 m. Pour le Sahara algérien on trouve un gradient géothermique moyen de 4 °C/100 m.

√ Le flux de chaleur: C'est la quantité de chaleur qui s'écoule par unité de temps, et il traduit la vitesse avec laquelle la terre perd sa chaleur.

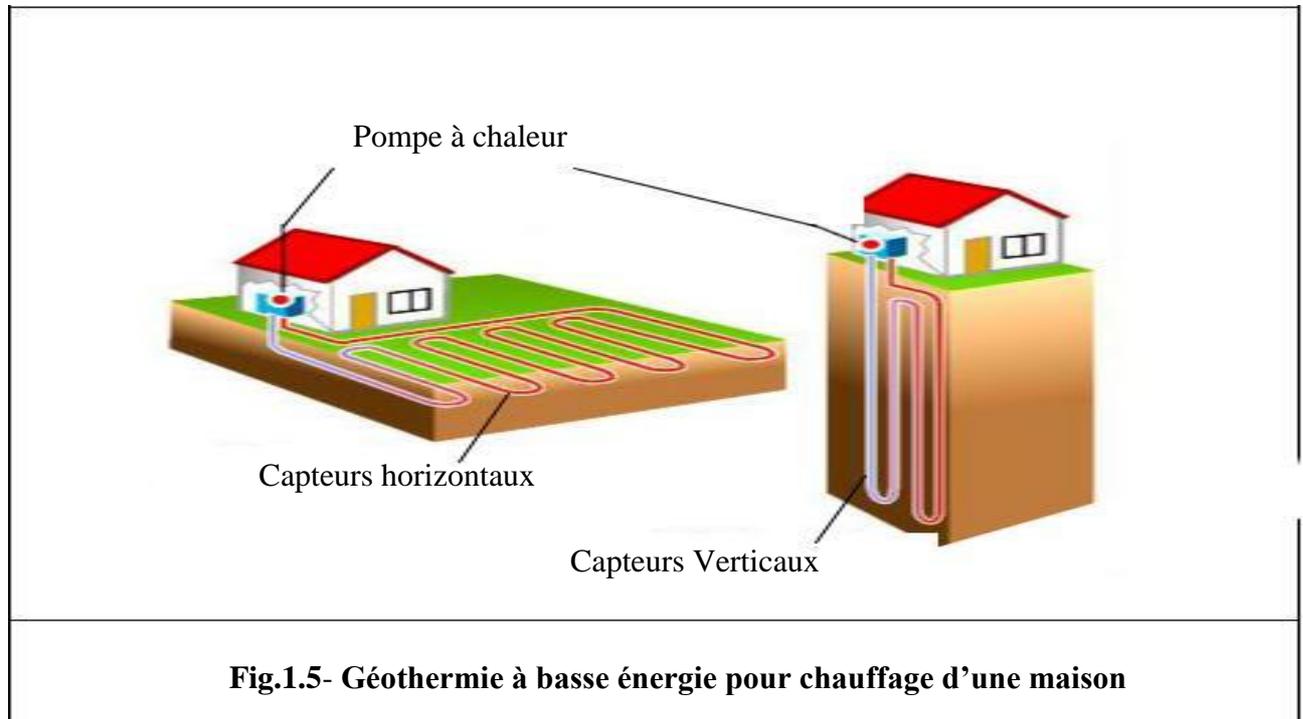
$$= -\lambda \cdot \text{grad}T(1-1)$$

Q : Flux de chaleur (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$).

λ : Conductivité thermique du milieu.



On remarque que Le flux géothermique correspond à une certaine quantité d'énergie libérée à la surface de la terre et il dépend du gradient géothermique de la conductivité thermique des roches du sous-sol. Alors ce dernier présente des valeurs différentes selon la région étudiée.



3- Energie biomasse.

La biomasse se définit comme « la fraction biodégradable » des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales. Toutes ces matières organiques peuvent devenir source d'énergie par combustion [9].

Le terme biomasse désigne un champ de matières très large : bois, déchets des industries de transformation du bois, déchets agricoles (pailles, lisiers, etc.), fraction fermentescible des déchets ménagers et des industries agro-alimentaires, biogaz de décharge ou encore produits de méthanisation (lisiers, boues d'épuration, décharges, etc...). Cette matière organique est exploitée grâce à des procédés thermiques (pyrolyse, gazéification, combustion directe) ou biochimiques (méthanisation) afin de produire de l'énergie.

1.2.2- Génération d'électricité.

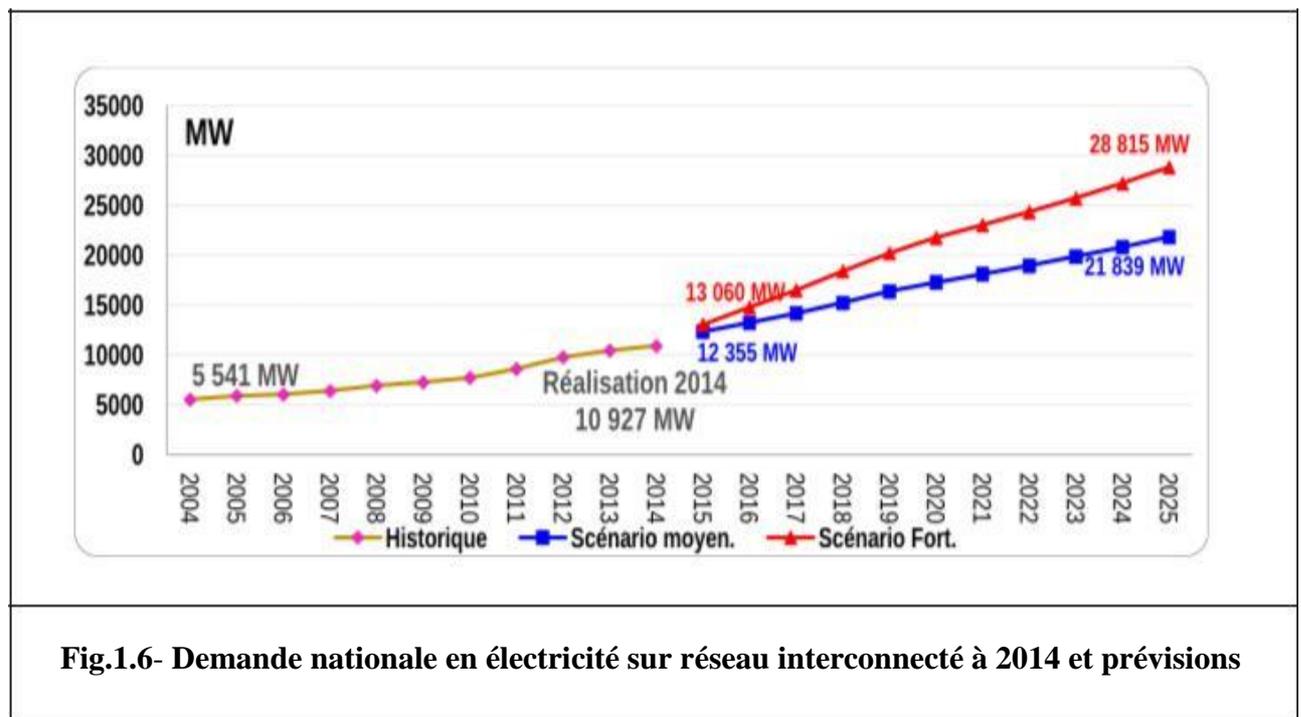
Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles, aux problèmes de l'environnement et à l'augmentation considérable des besoins en énergie électrique, le développement de nouvelles ressources énergétiques est l'une des priorités de la politique énergétique de beaucoup de pays. Les

énergies renouvelables représentent une alternative écologique aux combustibles fossiles, leur exploitation permettrait de fournir de l'électricité aux sites isolés.

Le caractère aléatoire des ressources d'énergie renouvelable fait que le système autonome utilisant une seule source d'énergie nécessite une large capacité de stockage [7]. L'utilisation des systèmes multi sources, permet d'une part, de réduire les besoins de stockage et, d'autre part, de constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes utilisés pour la génération d'électricité dans les régions isolées [17].

La production d'électricité d'origine renouvelable a atteint 3763 TWh en 2008 (18,7% de la production totale). Cette part reste supérieure à la production d'origine nucléaire (13,5%) mais largement inférieure à l'électricité produite à partir des combustibles fossiles 67,6% [7].

La figure ci-dessous donne selon la commission de développement des énergies renouvelable, l'évolution de la consommation nationale en électricité jusqu'à 2014 et prévisions horizon 2025.

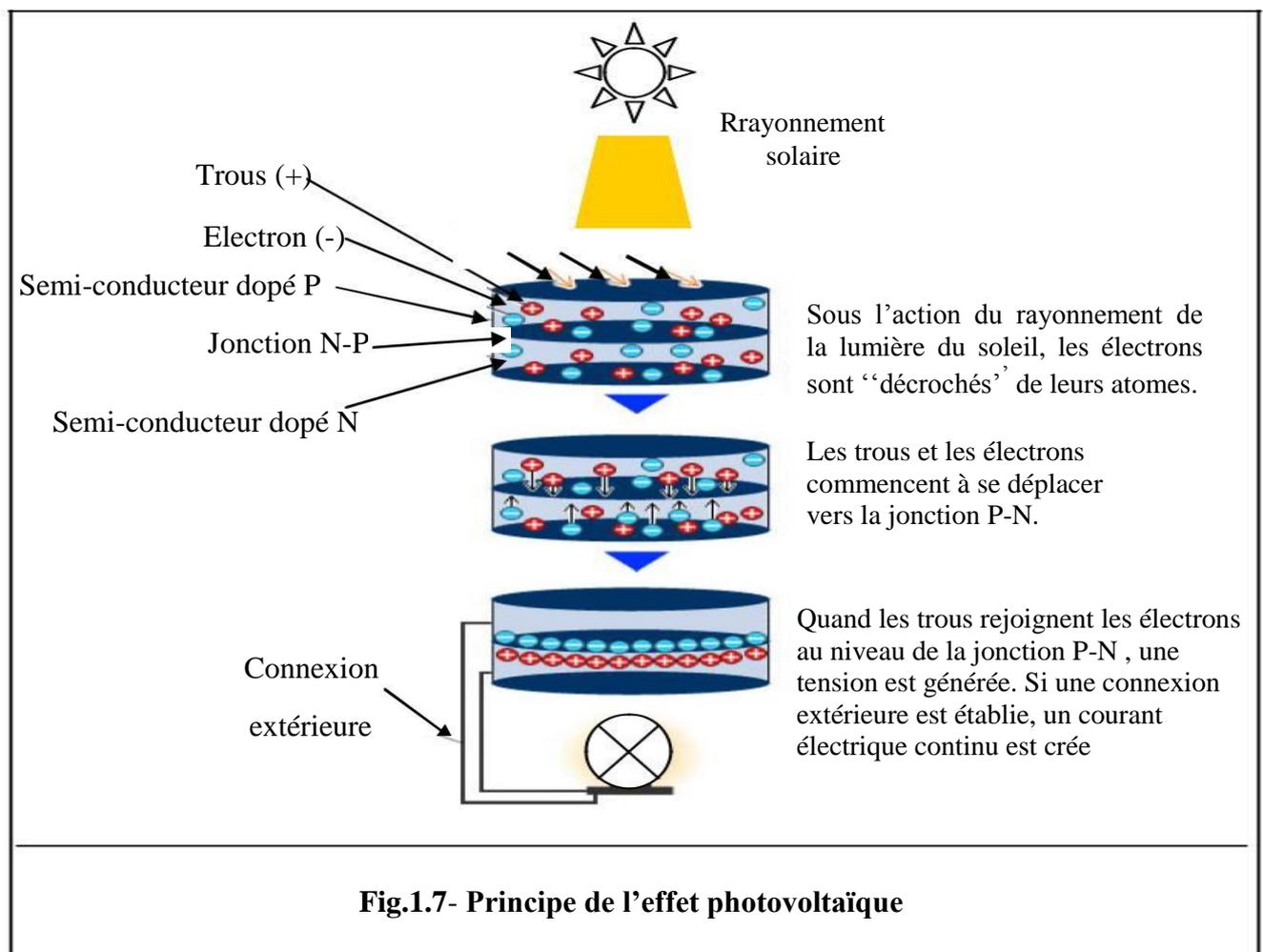


1- Energie Photovoltaïque.

L'énergie photovoltaïque soit connue depuis de nombreuses années comme source pouvant produire de l'énergie électrique allant de quelques milliwatts au mégawatt, il est solution attrayante comme remplacement ou complément des sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité en raison de ses nombreux avantages [8].

➤ Principe de l'effet photovoltaïque.

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : C'est l'effet photovoltaïque [12]. La cellule photovoltaïque est le composant électronique de base. Elle utilise l'effet photoélectrique pour convertir les ondes électromagnétiques émises par le soleil en électricité [1].



➤ **Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.**

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basé sur les mécanismes suivant [8]:

- √ Absorption des photons par le matériau constituant la cellule (généralement le silicium). Une partie donc du flux lumineux absorbé sera restituée sous forme d'énergie électrique
- √ Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur.
- √ Collecte des particules générées dans la cellule:

Le matériau constituant la cellule (silicium généralement) comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction dite (P-N) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule.

2- Energie hydraulique.

L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chute d'eau, cours d'eau, courant marin, marée, vague. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique. La force appliquée pour le mouvement dépend soit de la hauteur de la chute d'eau (centrales de haute ou moyenne chute), soit du débit des fleuves et des rivières (centrales au fil de l'eau). C'est une énergie qui n'émet pas de gaz à effet de serre, elle est utilisable rapidement grâce aux grandes quantités d'eau stockée et c'est une énergie renouvelable très économique à long terme [1].

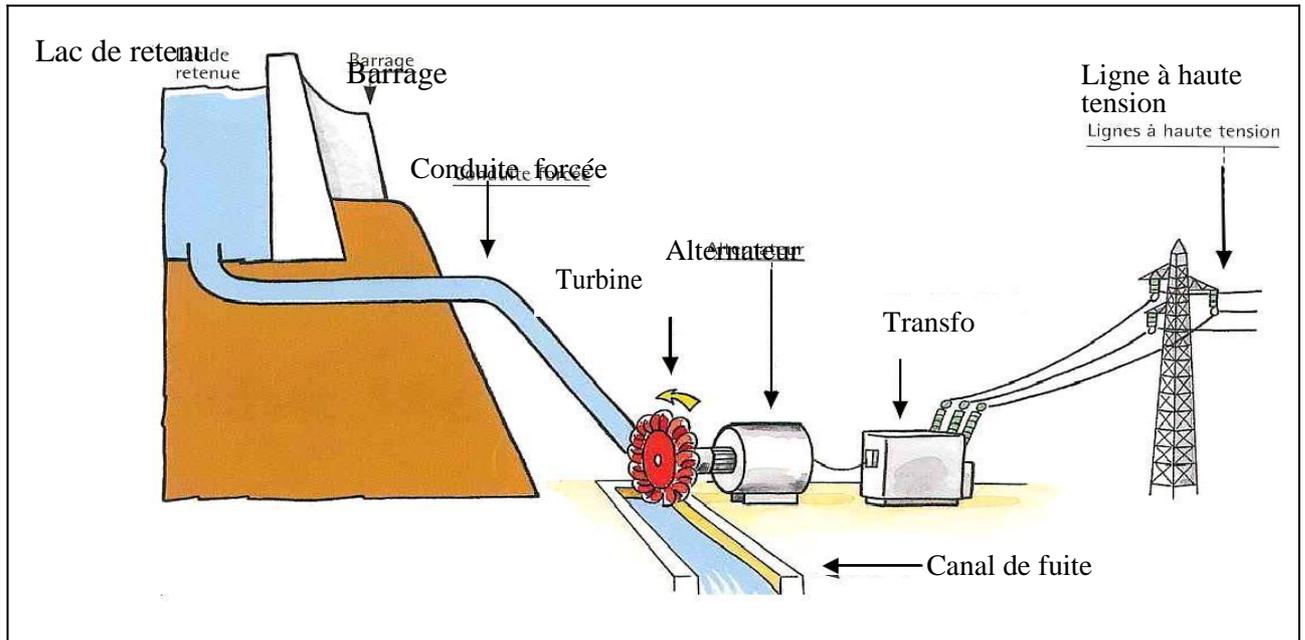


Fig.1.8- Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique

3- Energie éolienne.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne de vitesse des vents est la plus élevée).

De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif [18].

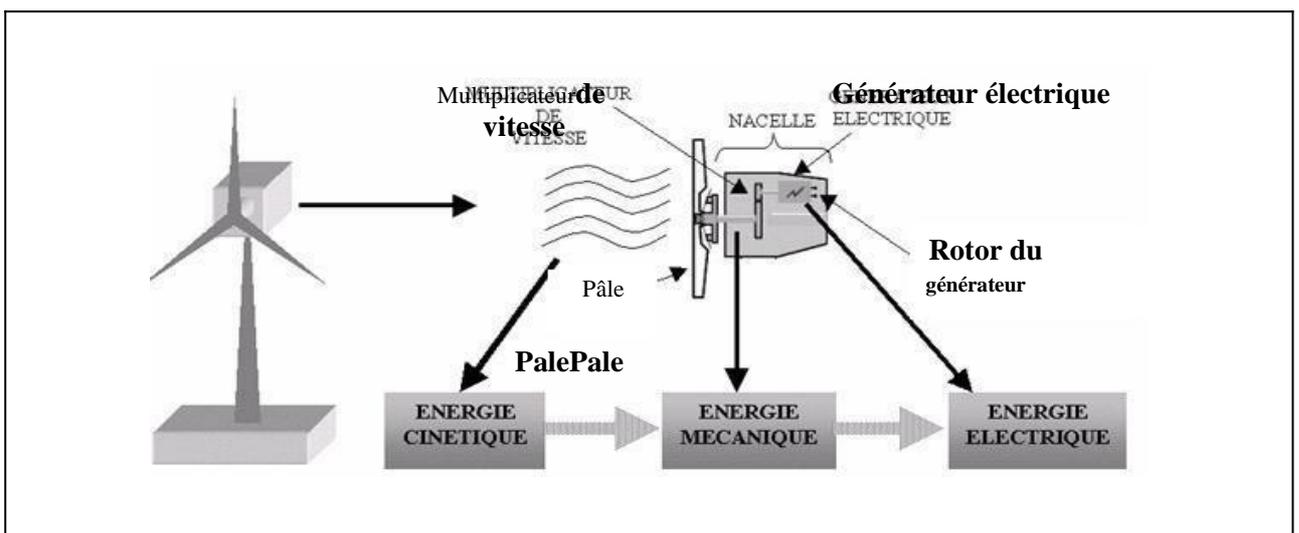
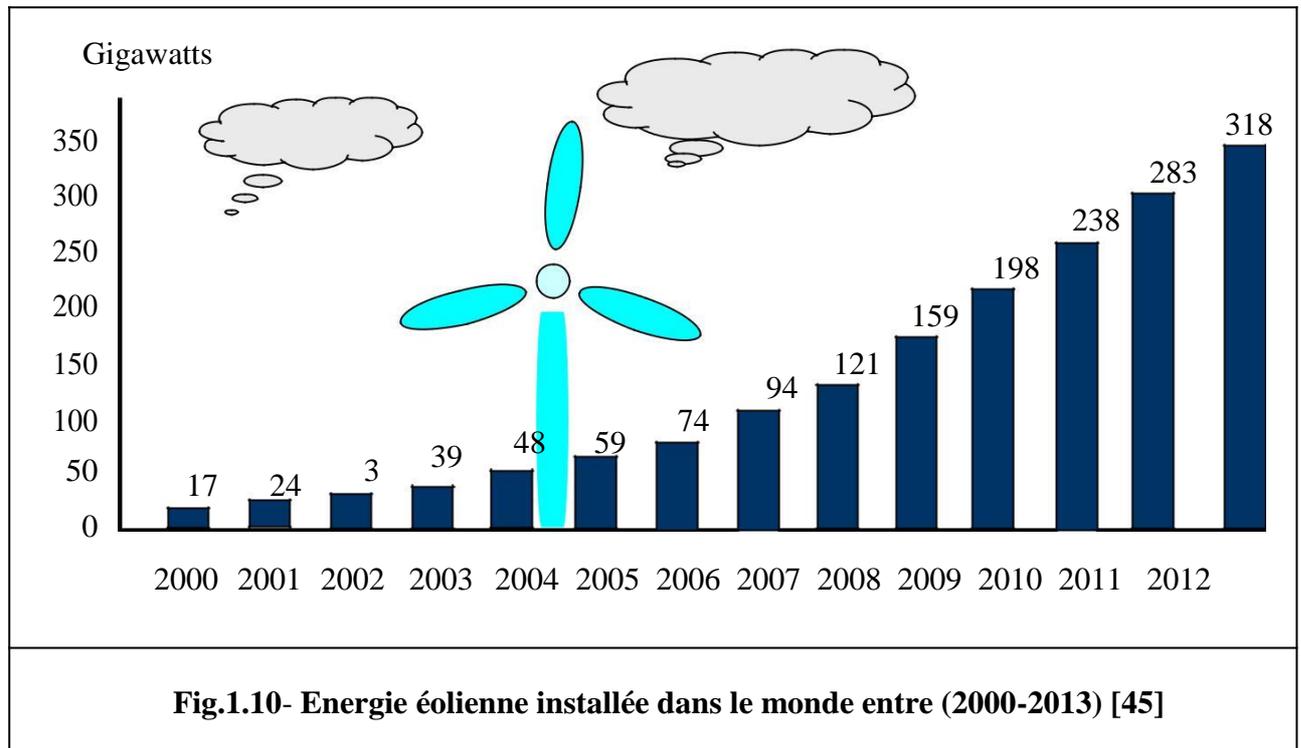


Fig.1.9- Fonctionnement d'une centrale éolienne [18].

La figure ci-après Selon le rapport établi par l'organisation internationale de l'énergie renouvelable du 21^{ème} siècle REN21, représente la puissance éolienne installée dans le monde entre 2000 et 2013.

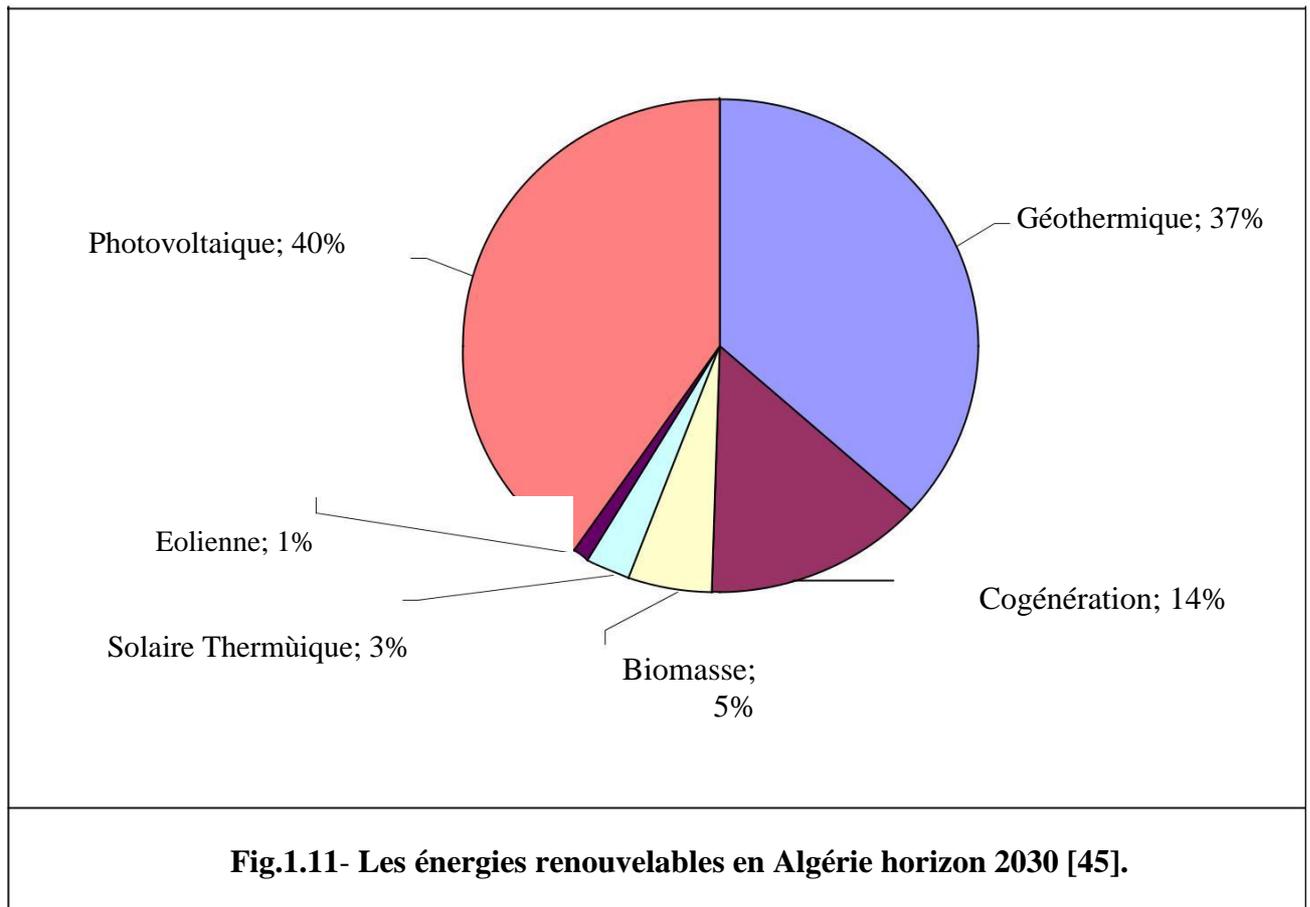


1.3- EVALUATION DE L'ENERGIE RENOUVELABLE.

Dans les pays d'Afrique du Nord, la production d'électricité est principalement basée sur les combustibles fossiles. L'Algérie présente la plus faible part d'énergies renouvelables dans la structure de sa production électrique, plus de 99% de la production totale d'électricité provient des combustibles fossiles. Le peu qui reste (0,7%) provient des énergies renouvelables qui se résument pratiquement à une production hydroélectrique [17].

Selon le commission nationale de développement des énergies renouvelables (CDER) dans sa version actualisée par les services du ministère de l'énergie en 2015 lance les pourcentages selon le type d'énergie comme indique la figure (1.14).

La réalisation du programme national permettra d'atteindre à l'horizon 2030 une part de renouvelables de près de 27% dans le bilan national de production d'électricité. Le volume de gaz naturel épargné par les 22 000 MW en renouvelables, atteindra environ 300 milliards de m³, soit un volume équivalant à 8 fois la consommation nationale de l'année 2014. Le programme de développement des énergies renouvelables se présente en deux phases (2011-2020) et (2020-2030) comme il est présenté sur le graphe ci-après :



En matière d'investissement dans le secteur des énergies renouvelables, il faut dire que les initiatives, en dehors de Sonelgaz, restent peu nombreuses, même si l'on compte quelques projets dans la fabrication des panneaux photovoltaïques [10].

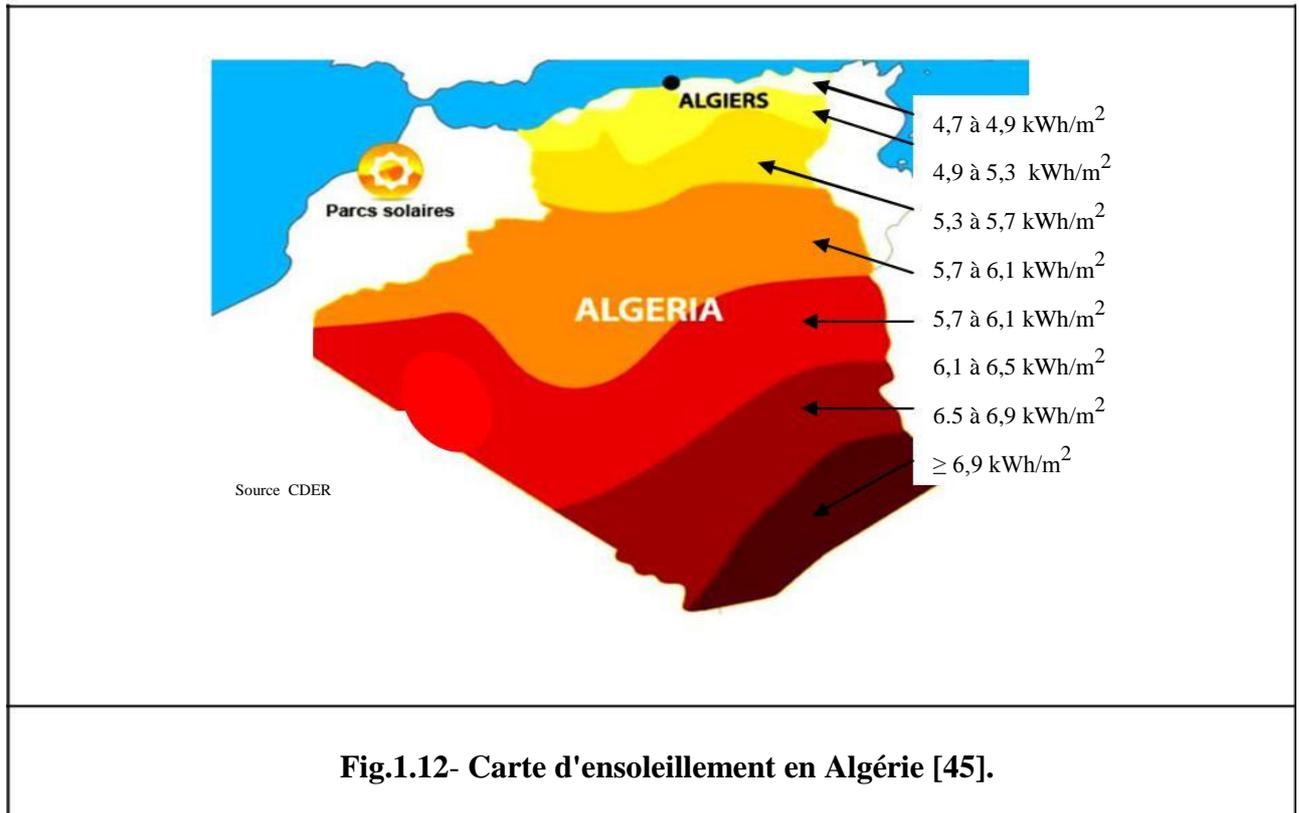
1.3.1- Potentiel solaire.

Selon Centre de développement des énergies renouvelables en Algérie (CDER), l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/ m^2 /an au Nord et 2263 kwh/ m^2 /an au sud du pays. Ce gisement dépasse les 05 milliards GWh.

Aussi selon la CDER, l'Algérie possède:

√ Plus de 3000 h/an d'ensoleillement.

√ Une irradiation moyenne de 5KWh/ m^2



1.3.2- Potentiel éolien.

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25 m fut racheté par l'électricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie [6].

L'Algérie à un régime de vent modéré (2 à 6 m/s). Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux [10].

1.3.3- Potentiel géothermique.

La compilation des données géologiques, géochimiques et géophysique a permis de tracer une carte géothermique préliminaire. Plus de deux cent (200) sources chaudes ont été inventoriées dans la partie Nord du Pays d'Algérie. Un tiers environ (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à 45 °C. Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre 118 °C à Biskra.

Des études sur le gradient thermique ont permis d'identifier trois zones dont le gradient dépasse les 5 °C/100 m tel que on trouve, zone de Relizane et Mascara, Zone de Aïne Boucif et Sidi Aïssa et Zone de Guelma et Djebel El Onk [15].

Bien que le potentiel géothermique soit très important dans notre pays, mais le domaine de l'exploitation reste limité et se restreint à la balnéothérapie et aux utilisations domestiques [10].

Selon une étude a été faite sur les caractéristiques de quelques sources thermale en Algérie, les résultats sont sur le tableau ci-dessous [10].

Sources Thermale	Région	Faciès Chimique	Résidus Secs (mg/l)	Température (°C)	Débit (l/s)
H.Chellala	Guelma	Sulfaté Magnésien	1600	98	100
H. Bouhdjar	Ain Temouchent	Chloruré Sodique	3210	66.5	100
H.Bouhanifia	Maskara	Bicarbonaté Sodique	1400	66	100
H. Boutaleb	Setif	Chloruré Sodique	3416	52	100
H.Essalhine	Khenchela	Chloruré Sodique	2082	70	100
H.Salhine	Skikda	Sulfaté Magnésien	2046	55	100
H.Sidi B.Abdallah	Relizane	Chloruré Sodique	1194	51	100
H.Dellaa	M'Sila	Sulfaté Magnésien	1980	42	100
H.Rabi	Saida	Sulfaté Magnésien	1524	47	100
H.Sillal	Bejaia	Chloruré Sodique	2221	46	100
H.Ben Haroun	Constantine	Chloruré Sodique	3762	42	10

1.3.4- Potentiel de l'hydroélectricité.

Les quantités globales tombant sur le territoire algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m³, mais finalement profitent peu au pays: nombre réduit de jours de précipitation, concentration sur des espaces limités, forte évaporation, évacuation rapide vers la mer. Schématiquement, les ressources de surface décroissent du nord au sud. On évalue actuellement les ressources utiles et

renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m³, dont environ 2/3 pour les ressources en surface. 103 sites de barrages ont été recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation. La production nationale de l'électricité à partir cette énergie est de 270 MW [10].

1.3.5- Potentiel de la biomasse.

Actuellement, la biomasse est la source d'énergie renouvelable avec le plus grand potentiel de contribuer à couvrir les besoins en énergie de la société moderne, aussi bien pour les économies développées que pour les économies en développement dans le monde entier [12].

On peut diviser le potentiel de la biomasse en deux types [10] :

➤ **Potentiel de la forêt :**

Le potentiel actuel est évalué à environ 37 Millions de TEP (Tonnes équivalent pétrole). Le potentiel récupérable est de l'ordre 3,7 Millions de TEP. Le taux de récupération actuel est de l'ordre de 10%.

➤ **Potentiel énergétique des déchets urbains et agricoles:**

Environ de 5 millions de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés. Ce potentiel représente un gisement de l'ordre de 1.33 millions de Tep/an.

1.4- AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES SOURCES ENR.

Comme toutes sources d'énergies, les sources d'énergies renouvelables ont leurs avantages et leurs inconvénients.

1.4.1- Avantages des énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables associent des avantages sur le plan environnemental, social, économique, ainsi que géopolitiques [13]:

1- Avantages sur le plan environnemental.

√ L'énergie renouvelable n'est pas limitée par l'épuisement de son gisement.

√ La production de gaz à effet de serre est le plus souvent nulle.

√ Les déchets produits par un système de production d'énergie renouvelable sont peu nombreux.

2- Avantages sur le plan social.

√ Les impacts en cas d'accident grave sont plus facilement maîtrisables comparés à ceux de l'industrie électronucléaire ou pétrolière.

√ Les déchets sont peu dangereux.

3- Avantages sur le plan économique.

√ Le coût d'une énergie renouvelable est surtout fixé par l'investissement industriel. Il ne dépend pas des variations des cours du pétrole, du gaz ou des matières premières.

√ Le démantèlement des systèmes de production d'énergie renouvelable est facile, rapide et peu coûteux.

1.4.2- Inconvénients des énergies renouvelables.

Même si les énergies renouvelables sont théoriquement inépuisables, ce qui est considéré comme avantage, mais ces énergies ont beaucoup d'inconvénients tel que leurs potentiel varie selon les conditions climatique, la localisation géographique, le cout d'investissement, souvent le rendement de production est faible et la difficulté de stockage de l'énergie produite par ces énergies.

1.5- CONCLUSION.

Dans ce chapitre nous avons présenté une brève description du domaine des énergies renouvelables existant pour la production de chaleur que d'électricité. Nous avons cité par la suite les principales sources d'énergies renouvelables et leurs potentiels de développement. Aussi nous avons vue que la production d'énergie basée sur les énergies renouvelables constitue un excellent moyen de protéger l'environnement et d'acquérir une sécurité à long terme sur le plan énergétique.

Dans ce qui suit, et parmi les énergies renouvelables, nous nous intéresserons à l'énergie solaire et en particulier son application à la production de l'énergie électrique par la technique de la photovoltaïque.

2. PRESENTATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

2.1- INTRODUCTION

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de produire de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Cette énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui vont bombarder les atomes de silicium en heurtant les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Le rendement de la conversion des rayonnements solaire dépend ainsi de plusieurs paramètres tel que la latitude du lieu, l'inclinaison de la surface terrestres, période de l'année,...etc.

2.2- POTENTIEL SOLAIRE

Le soleil est une étoile parmi des milliards d'autres. Il est composé de plusieurs d'éléments chimiques. Il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium transforme chaque seconde 564 million de tonnes d'hydrogène et 560 millions tonnes d'hélium dont 4 millions tonnes d'énergie est dispersée sous forme de rayonnement. La lumière reçue du soleil, à une vitesse de 300000 km/s, prend environ 8 minutes pour parvenir à la terre, avec une longueur d'onde d'environ $0.5\mu\text{m}$ [20].

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans une région donnée et au cours d'une période donnée. L'étude du gisement est le point de départ de toute investigation et l'élément indispensable dans le domaine de l'énergie solaire [21].

L'énergie solaire reçue par la terre en dehors de l'atmosphère est environ $1\ 370\ \text{W/m}^2$. Cette grandeur est appelée constante solaire [22]. Les réactions thermonucléaires qui se produisent au sein du soleil, provoquent l'émission d'onde électromagnétique de très forte puissance ou rayonnement thermique solaire [2] [26]. L'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, peut atteindre près de 3900 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de $1\ \text{m}^2$ est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure

partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au Sud du pays. Il représente 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays [23].

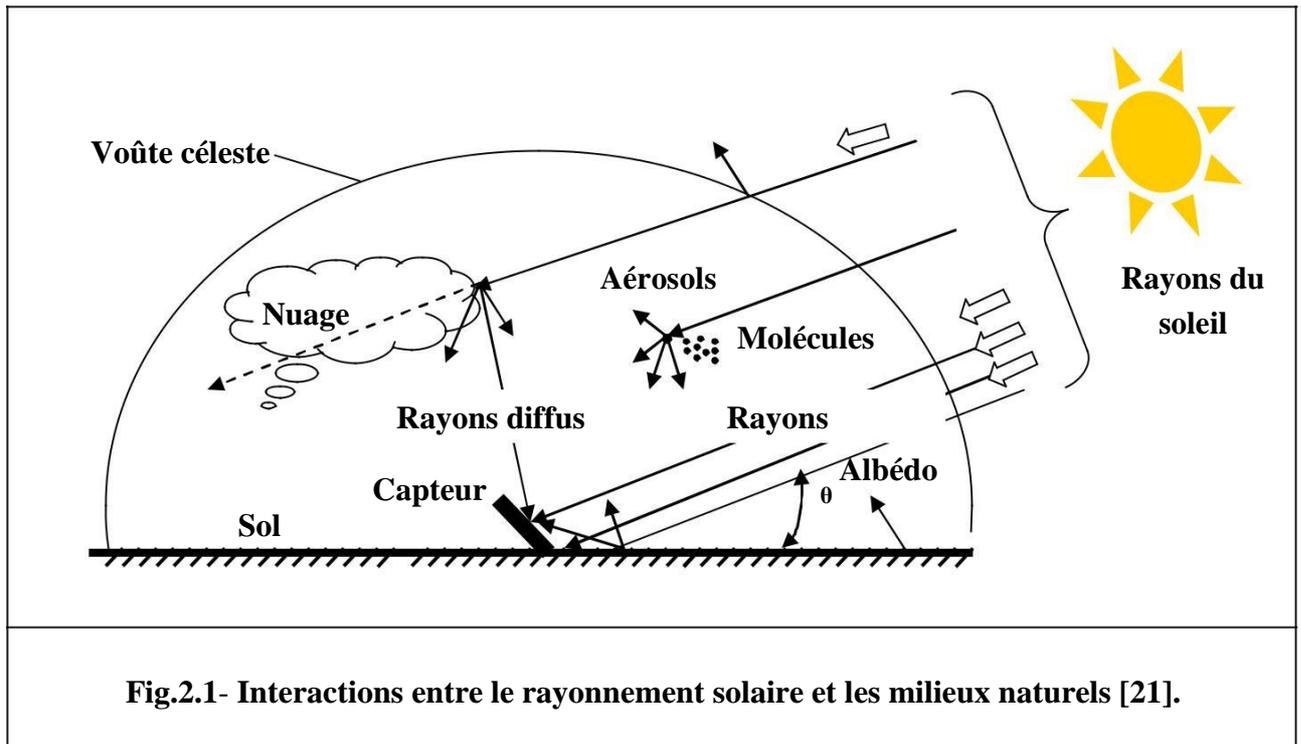
2.2.1- Carte d'Identité du Soleil:

Le tableau ci-après représente selon la Société d'Astronomie Populaire Française la fiche technique du soleil.

Tab.2.1- Fiche D'identité du soleil	
Caractéristiques	description
Age	4,5 milliards d'années
Révolution autour du centre de la Galaxie	210 millions d'années
Localisation dans la Galaxie	25 000 années de lumière du centre
Distance moyenne à la Terre	149 597 870,7 km (unité astronomique)
Energie totale émise	3,83 1023 kW
Température au centre	15,1 millions de K
Température effective moyenne	5800 Kelvin (0 K = -273,15 °C)
Rayonnement	Le Soleil rayonne le maximum de son énergie
Type spectral	G2V
Magnitude absolue	+ 4,83
Magnitude apparente	- 26,74
Vitesse de rotation	26 j à l'équateur, 31 j à 60 de latitude, 37j. aux pôles
Vitesse de libération à la surface	618 km/s (11,2 km/s sur Terre)
Accélération de la gravité	274,5 m/s ²
Masse volumique	1,4 (pour l'eau)
Composition chimique (en masse)	Hydrogène:73%, Hélium: 25 %, restes éléments: 2%

2.2.2- Rayonnements solaires.

Le rayonnement solaire est l'ensemble du rayonnement émis par le Soleil dont une partie parvient constamment à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. Le rayonnement solaire peut être absorbé ou diffusé par les milieux que rencontre. Le schéma ci-dessous illustre la variété des interactions possibles entre le rayonnement solaire et les milieux naturels.



2.2.3 Rôle de l'atmosphère

L'atmosphère est composée de plusieurs couches superposées les unes sur les autres. Depuis le sol on peut distinguer la couche dite la troposphère, la mésosphère suivie de la thermosphère.

Lors de la traversée de l'atmosphère le rayonnement solaire subit une atténuation importante de sa quantité, mais il reste une partie assez importante qui arrive au sol. On peut ainsi compter sur 1000W/m^2 crête dans les zones tempérées et jusqu'à 1400W/m^2 dans les zones possédant une atmosphère de faible pollution [21].

2.2.4 Spectre solaire

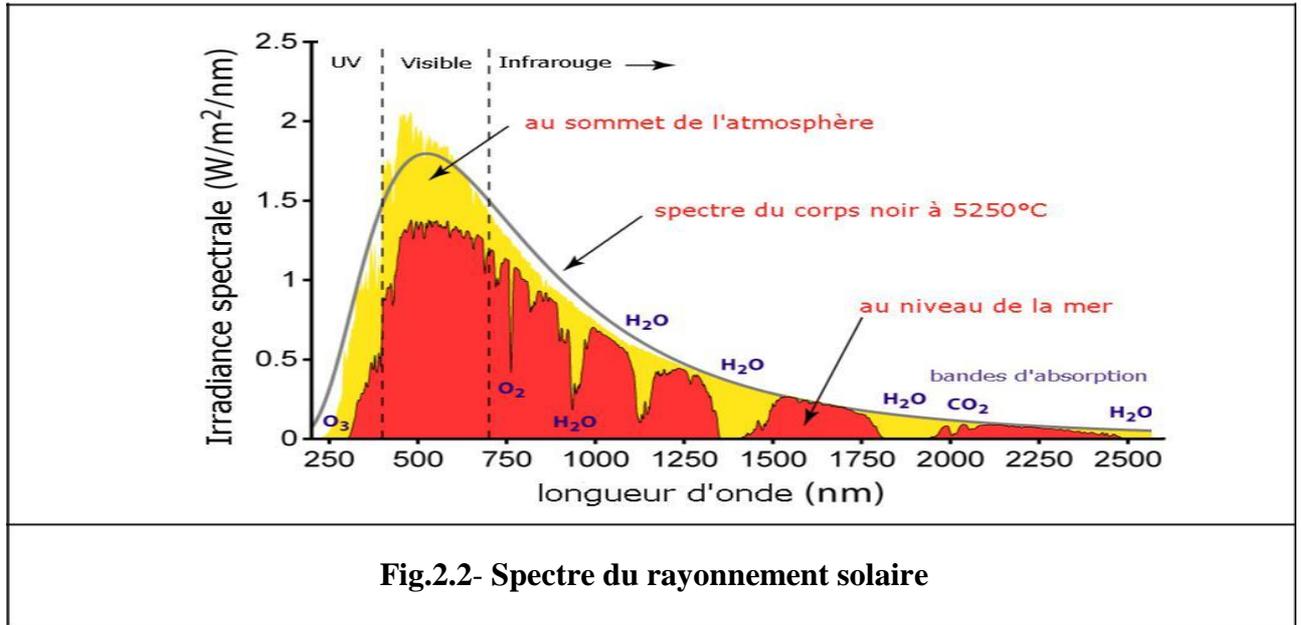
On appelle émittance énergétique E (en un point d'une surface) le quotient du flux énergétique émis par un élément de surface par l'aire de cet élément [6] :

$$dE = \frac{d\phi}{dS} \quad (2-1)$$

L'émittance énergétique monochromatique E_λ est l'émittance énergétique de radiation comprise entre λ et $\lambda + d\lambda$ ou $d\lambda$ est un infiniment petit positif, tel que :

$$E = \int E_{\lambda} d\lambda \tag{2-2}$$

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 (O₃, CO₂, H₂O,...). Les conditions climatiques ainsi que la présence de particules influencent également la valeur réelle du spectre [8].



2.2.5 Nombre de masse d'air

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus le rayonnement solaire va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir de transformation. On appelle masse d'air, le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu [21].

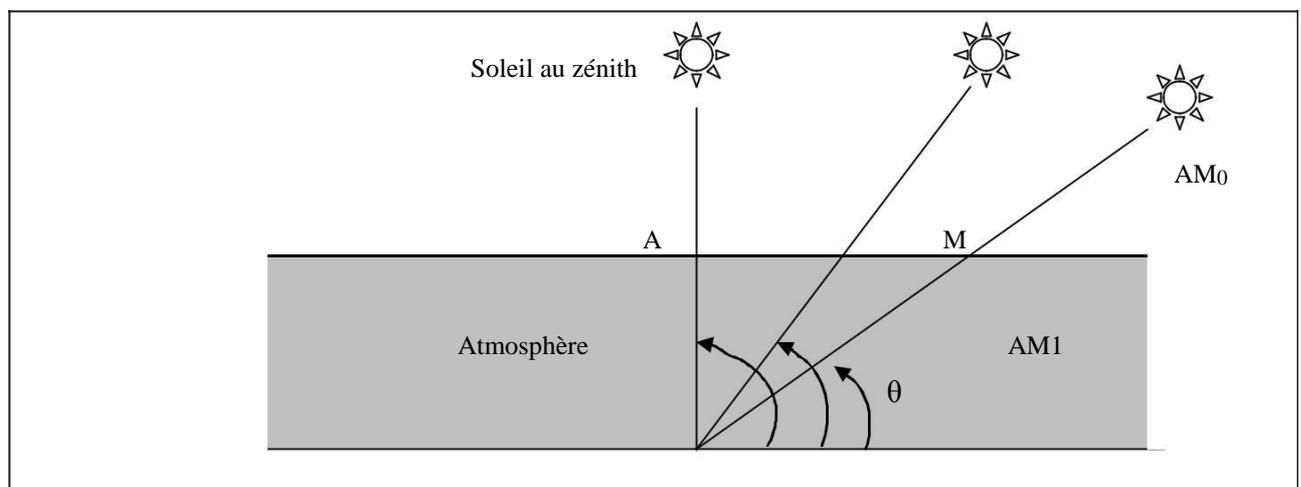


Fig.2.3- Définition du nombre de masse d'air en (terre plate)

Selon la définition précédente on peut exprimer le nombre masse d'air comme suivant:

On prend $x = OM$ alors $OM = \frac{OA}{\sin \theta}$ Donc l'air masse AM_x est donné par :

$$x = \frac{1}{\sin \theta} \quad (2-2)$$

Par convention, AM_0 correspond aux conditions hors atmosphère.

Pour $\theta = 48,190$ la lumière incidente est dite $AM_{1,5}$.

Pour $\theta = 30^0$ la lumière incidente est dite AM_1 .

Le nombre de masse d'air caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire (83.3 W/cm² pour $AM_{1.5}$ dont la surface est inclinée à 37° du soleil) et de plus, sert de standard pour quantifier les performances de nouvelles diapositives photovoltaïques [21] [8]. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m² et il est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM_1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m². Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : $AM_{1.5G}$ ou $AM_{1.5D}$. Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith). Le « E » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct [2].

Les conditions standards de qualification des modules photovoltaïques sont : un spectre $AM_{1.5}$ sous un éclairement de 1000W/m² et une température de 25 °C [25].

Signalons que l'irradiation solaire dépend :

√ Orientation et inclinaison de la surface.

√ Latitude du lieu et son degré de pollution.

√ Période de l'année.

√ Instant considéré dans la journée.

2.2.6- Constante Solaire

La constante solaire est une valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, sa valeur est estimée à 1367 W/m^2 [24].

2.2.7- 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].

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda'} \quad (2-3)$$

Avec :

E : Energie lumineuse.

h : Constant de Planck

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

ν : Fréquence (S^{-1})

λ' : Longueur d'onde (m)

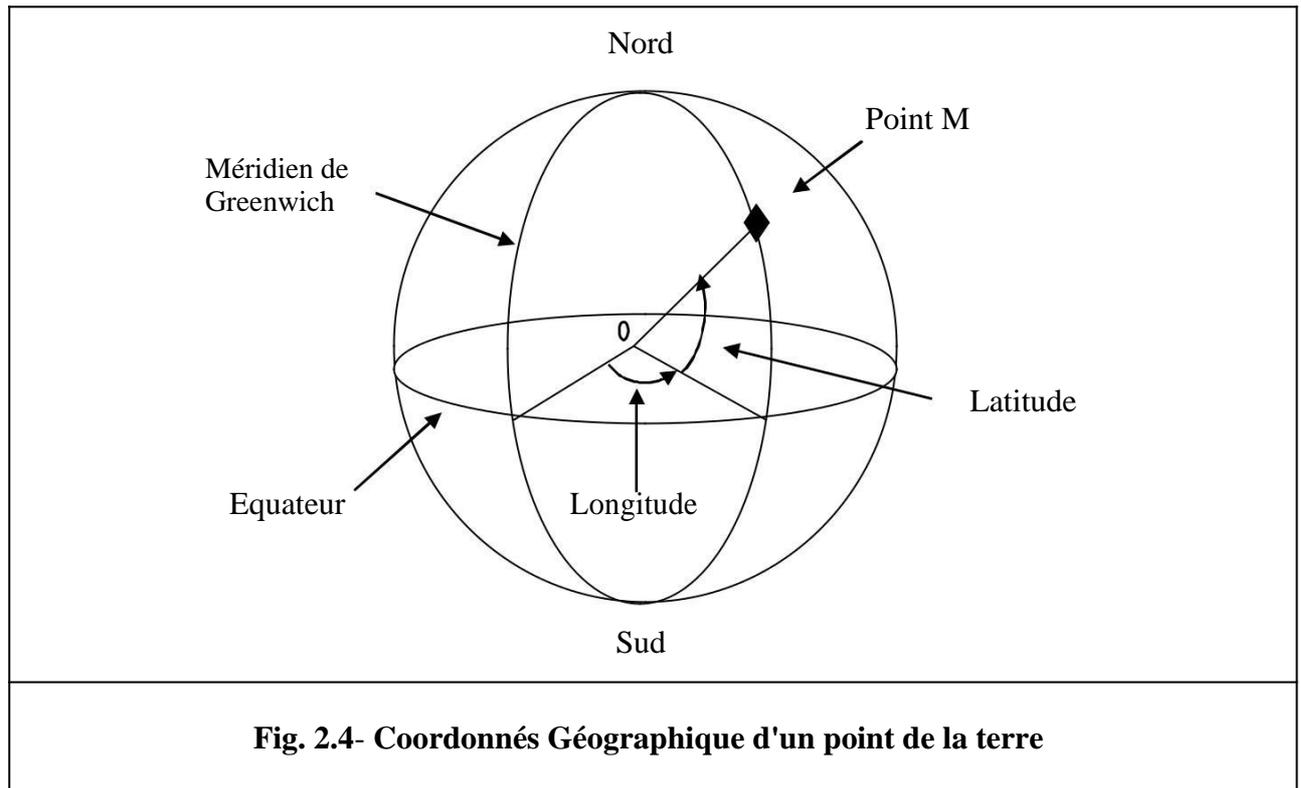
Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre $0,2\mu\text{m}$ (ultra-violet) et $4\mu\text{m}$ (infrarouge) avec un maximum d'énergie pour $0,5\mu\text{m}$. 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre $0,2\mu\text{m}$ et $2,5\mu\text{m}$. De $0,4\mu\text{m}$ à $0,78\mu\text{m}$, le spectre correspond au domaine du visible [22].

2.3 PARAMETRE DE POSITION D'UN POINT SUR LA TERRE.

La Terre est pratiquement une sphère qui tourne autour d'un axe passant par le pôle Nord et le pôle Sud. Chaque point M sur la surface de la terre est caractérisé par des coordonnées géographiques et coordonnées horaires.

2.3.1 Coordonnées géographiques terrestres

Tout point M sur la terre est caractérisé par sa latitude, sa longitude et son altitude. Les deux premières grandeurs représentent les coordonnées géographiques de ce point voir comme est représenté dans la Figure (2.4) [8].



➤ La latitude

L'angle de latitude est l'angle entre une ligne tracée d'un point sur la surface de la terre avec le centre de cette dernière, et le cercle équatorial de la terre. La convention de signe affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) tous les lieux de l'hémisphère sud. La latitude sera désignée ici par lettre (ϕ), et peut ainsi être composée entre -90° et $+90^\circ$ [27].

➤ La longitude

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien d'origine passant par la ville de Greenwich. Sa valeur est positive à l'ouest et est négative à l'Est du méridien origine [24] [8].

➤ L'altitude

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale en mètre entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer) [8].

2.3.2- Coordonnées Horaires terrestres

Les coordonnées horaires sont [23] :

➤ **L'angle horaire (ω):** Est l'angle que fait le plan contenant le cercle horaire soleil avec le plan contenant le méridien céleste, il est compté positivement l'après midi. Il est mesuré en heures, minutes et secondes, comme l'ascension droite.

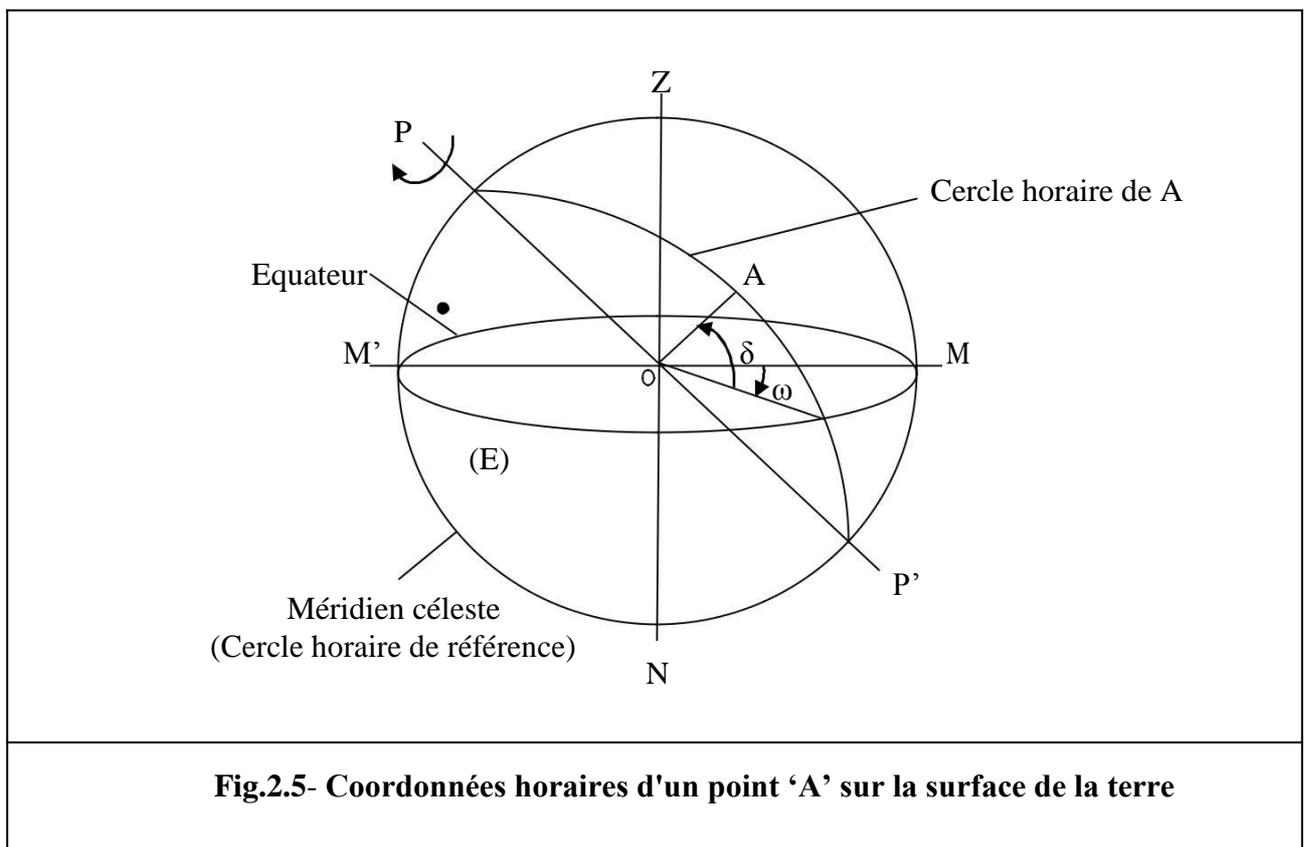
➤ **La déclinaison (δ):** est l'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année entre -23.45° et $+23.45^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la formule suivante:

$$\delta = 23.45 \sin[0.980(j + 284)] \quad (2-4)$$

Où ;

δ : est la déclinaison en (degré).

j : est le numéro du jours de l'année



2.3- POSITION DU SOLEIL

Pour bien comprendre et utiliser l'influence du soleil dans le choix et le traitement d'un site, il faut bien sûr connaître à tout instant la position du soleil dans le ciel. Cette information est indispensable

pour le calcul des apports solaires, pour le choix de l'exposition d'un immeuble, l'aménagement des parties extérieures voisines, la disposition des pièces intérieures, l'emplacement des fenêtres, des protections solaires et essentiellement le choix des sites solaires. La position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents [28].

➤ Coordonnées équatoriales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles (d , H). (Fig. 2.6).

➤ **Déclinaison du soleil** : c'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial qui est donné par la formule: [28]

$$d = \arcsin \left[0.389 \sin \left(\frac{360}{365} (j - 82) \right) + 2 \sin \left(\frac{360}{365} (j - 2) \right) \right] \quad (2-5)$$

j est le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.

➤ **Angle horaire du soleil** : C'est l'angle compris entre le méridien origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel [23].

$$H = 15(TVS - 12) \quad (2-6)$$

$$TSV = TL - DE + \left(\frac{E_t + 4\lambda_1}{60} \right) \quad (2-7)$$

$$E_e = 9.87 \sin(2j^\circ) - 7.53 \cos(j^\circ) - 15 \sin(j^\circ) \quad (2-8)$$

$$j^\circ = \frac{360}{365} (j - 81) \quad (2-9)$$

TSV : temps solaire vrai, le temps solaire vrai est égal au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude référence.

L'angle H vaut 0° à midi, 90° à 18 heures et -90° à 6 heures en heure solaire vrai.

DE: décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich. (Égale 1 pour l'Algérie).

Le terme relatif à l'équation du temps est généralement négligeable.

TL: temps légal (Donné par une montre).

E_t : correction de l'équation du temps.

λ_1 : longitude de lieu.

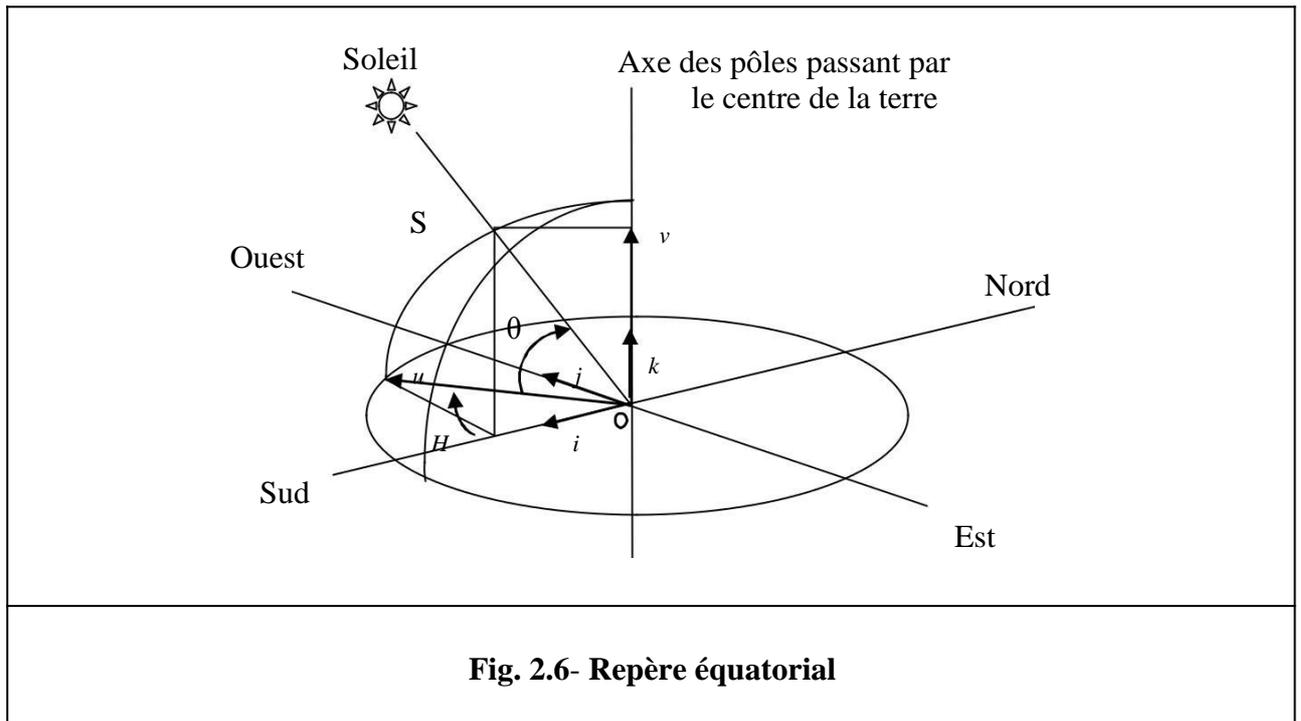


Fig. 2.6- Repère équatorial

➤ **Coordonnées horizontales**

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et le vertical du lieu. Dans ce repère, les coordonnées sont la hauteur h et l'azimut a.

√ Hauteur du soleil.

C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Il est particulièrement égal à:

0° au lever et au coucher astronomiques du soleil,

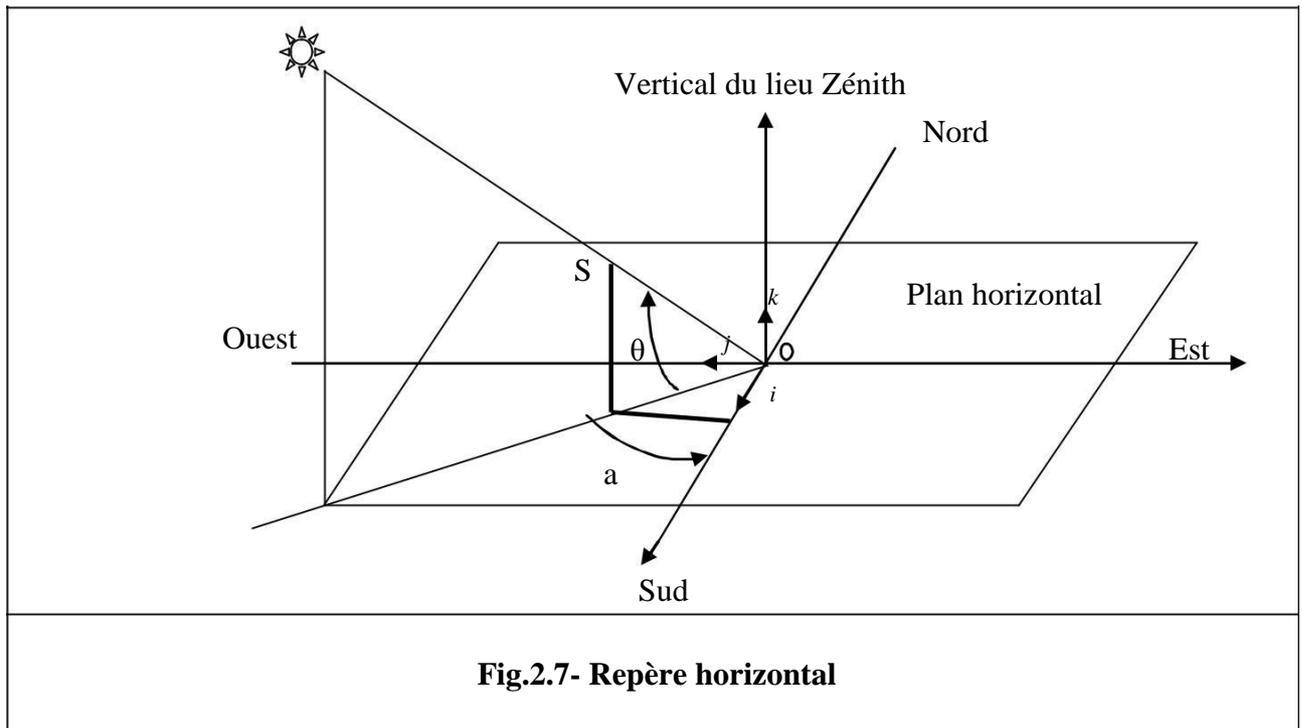
90° à midi temps solaire vrai

$$\sin(\theta) = \cos(d) \cos(j) \cos(\alpha) + \sin(j) \sin(d) \tag{2-10}$$

√ Azimut du soleil.

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction sud.

$$\sin(a) = \frac{\cos(d) \sin(\theta)}{\sin(j)} \tag{2-11}$$



2.5- DIFFERENTS TYPES DE RAYONNEMENT SOLAIRE.

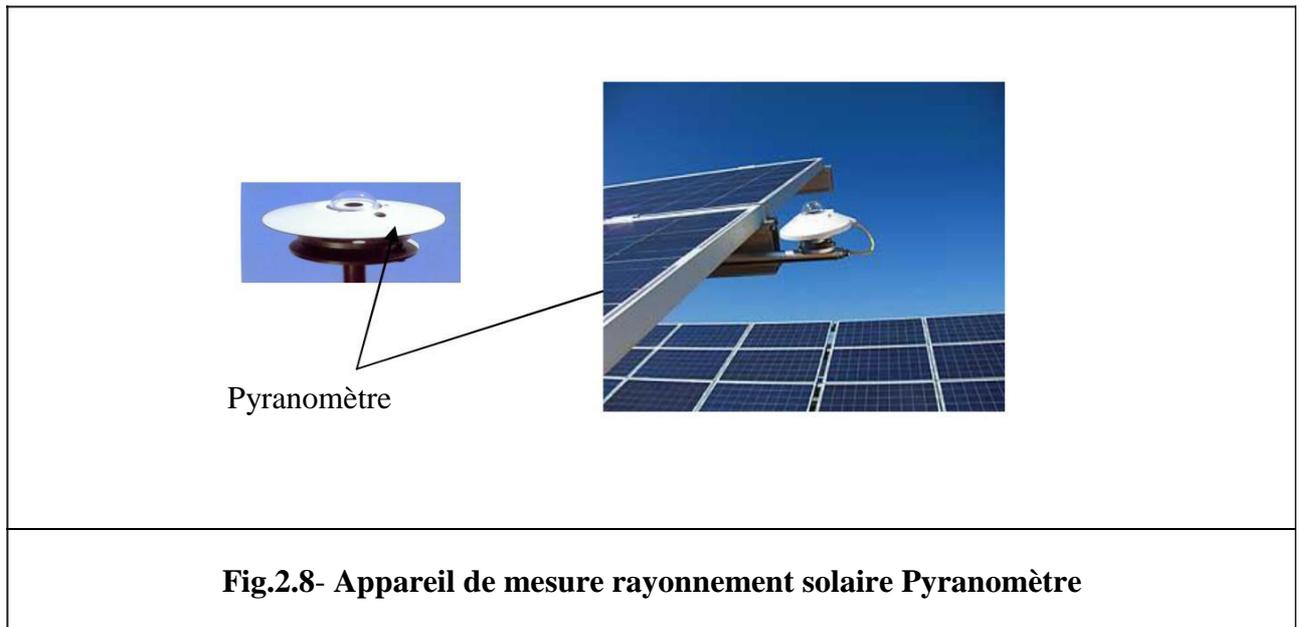
A l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue trois composantes principales à partir du rayonnement global qui est le résultant des trois rayonnements [8] [20].

2.5.1- Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement reçu directement du Soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

2.5.2- Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. Nous pouvons mesurer la longueur d'onde grâce à un pyranomètre qui est protégé du soleil pour éviter de mesurer les rayons UV que nous allons voir dans le rayonnement direct: Les rayons de l'atmosphère pénètrent à l'intérieur du couvercle pour alimenter la batterie et pour donner par l'intermédiaire d'un câble électrique la puissance émise par les rayons de l'atmosphère. Cet instrument est surtout utilisé pour étudier le réchauffement climatique de la terre.



2.5.3- L'albédo ou réfléchi.

C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchie par un obstacle. Par définition, le corps noir possède un albédo nul. Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo qui est exprimé sans unité $0 \leq \varepsilon \leq 1$ [8].

2.6- EFFET PHOTOVOLTAÏQUE.

Le terme photovoltaïque est formé de deux mots Photon, qui signifient lumière et le mot Volta, du nom du physicien Alessandro Volta (1745-1827), inventeur de la pile électrique.

L'effet photovoltaïque constitue à la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium [28].

2.6.1- Histoire de la Photovoltaïque.

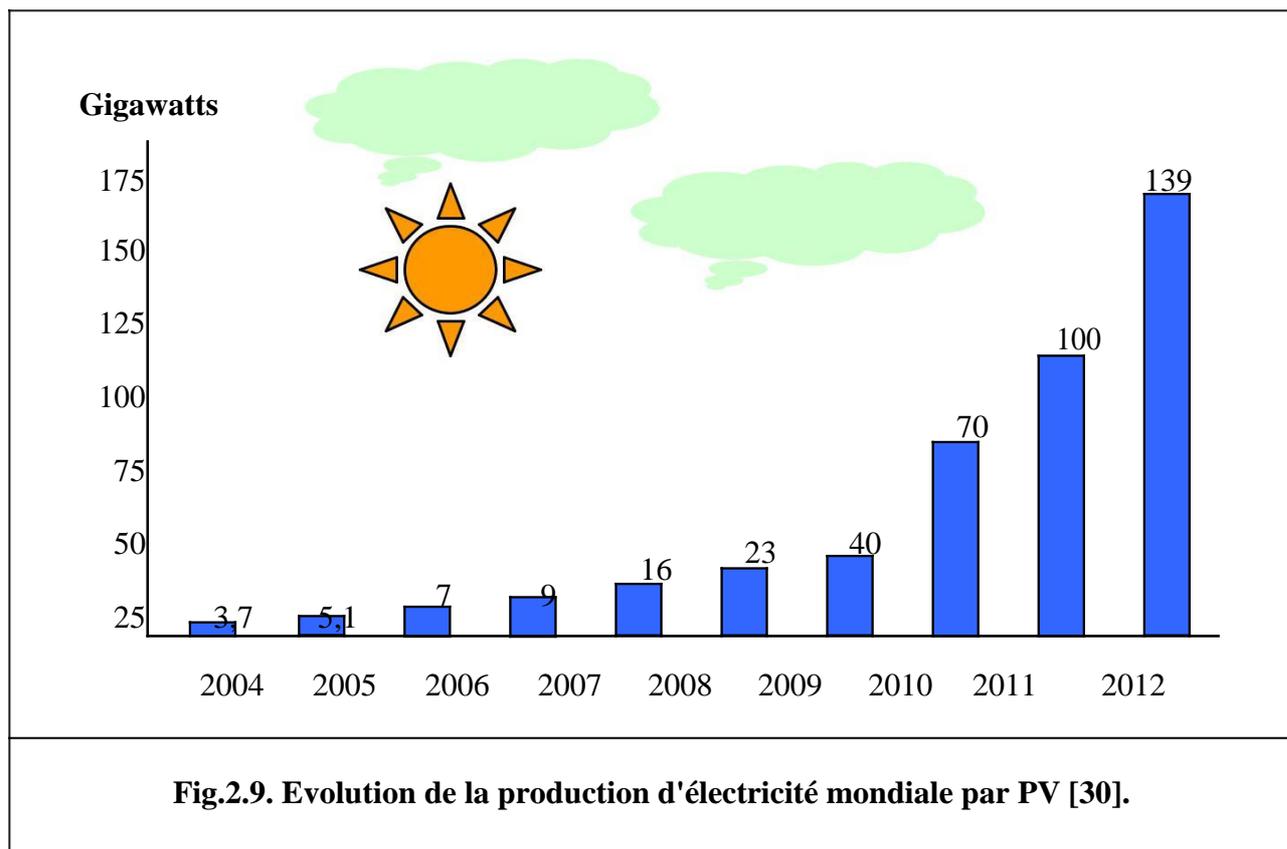
L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs.

Le tableau suivant résume l'histoire de la photovoltaïque [20].

Tab.2.2- Histoire du développement de la photovoltaïque	
Année	Événement
1839	Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque
1883	Fritts réalise des cellules solaires de grande surface à base de Se
1954	Des rendements de 6% sont obtenus : par labo Bell à USA
1955	Hoffman électroniques (USA) propose des cellules Si à 2 % de rendement à \$1500/W
1958	Kearns et Calvin ont démontré l'effet photovoltaïque d'une cellule à base de MgPh
1970	Première cellule solaire à hétéro structures GaAs élaborée par Alferov, Andrée et al.en URSS
1973	Première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université Delaware, USA ; à base de Cu ₂ S
1980	La première cellule à base de Cu ₂ S/CdS délivrant un rendement > 10%
1982	Première unité de production de 1 MW (Californie, USA) avec des cellules Arco Si
1985	Les cellules à base de Si donnent un rendement > 20% sous le rayonnement solaire
1994	Rendements > 30 % avec des cellules à concentration multi jonctions à base de GaInP/GaAs
1996	Les cellules solaires hybrides à colorants atteignent un rendement de 11% .
1998	Cellules couches minces Cu(InGa) Se ₂ atteignent un rendement de 19% .
2000	Le photovoltaïque installé mondial cumulatif atteint 2000 MW
2007	Cellules solaires organiques en structure tandem avec un rendement de 6,5 % .
2008	Un rendement homologué de 5,9% sur une surface active de 2 cm ² obtenu par Heliatek, BASF et l'Institut de photovoltaïque appliquée (IAPP) de l'Université technique de Dresde (Allemagne).
2009	Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 6,1 % à base de PCDTBT et PC70BM (UCSB, USA)Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 7,4 % à base de PBDTTT-CF et PC70BM (Solarmer Energy Inc., University of California, University of Chicago, USA)

Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire (panneau solaire) [20]. L'ensemble de panneaux photovoltaïques interconnectés forme le générateur. Celui-ci est caractérisé par sa puissance crête exprimée en kilowatt crête (kWc) [29].

La figure (2.9) représente l'évolution de la production d'énergie électrique mondiale à partir de l'énergie solaire par l'effet photovoltaïque.



2.6.2- Cellule photovoltaïque

La cellule PV 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 de [31] :

- 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 antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous.

Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

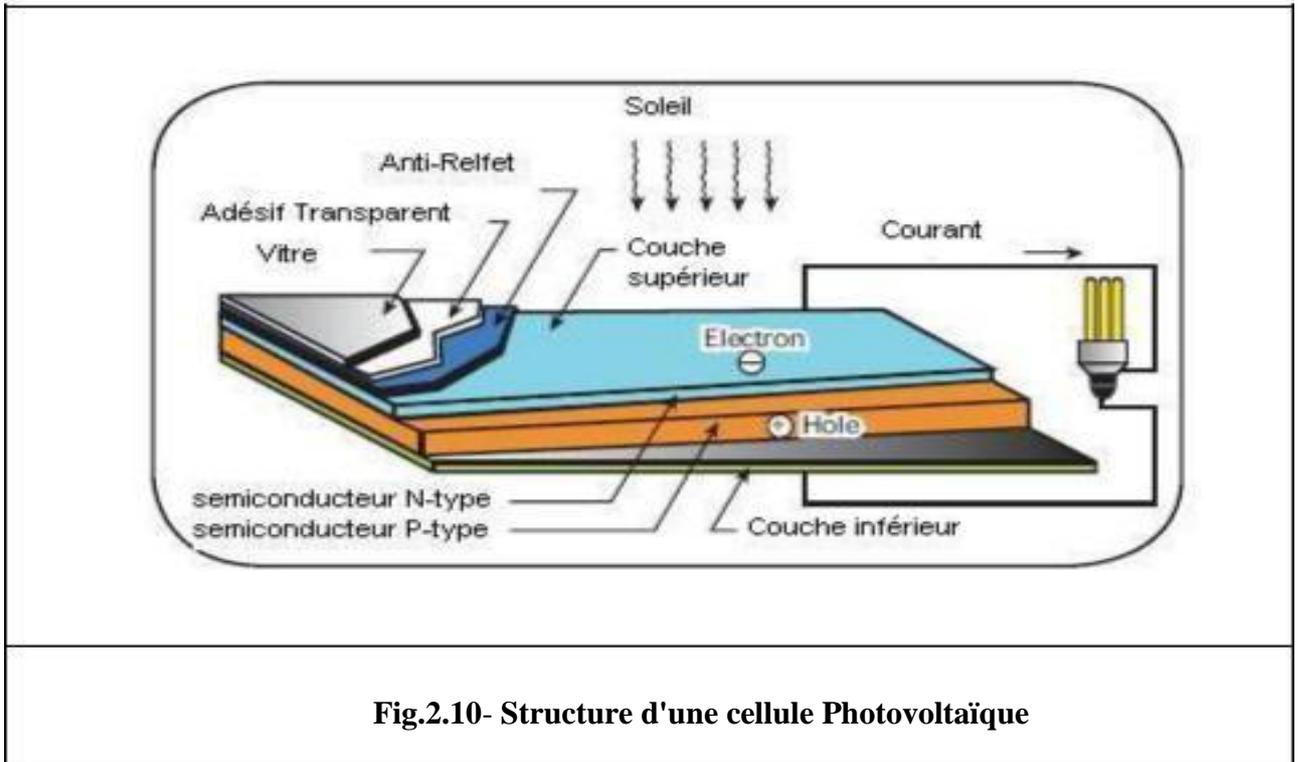


Fig.2.10- Structure d'une cellule Photovoltaïque

2.6.3- Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charge N) et des trous. Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches.

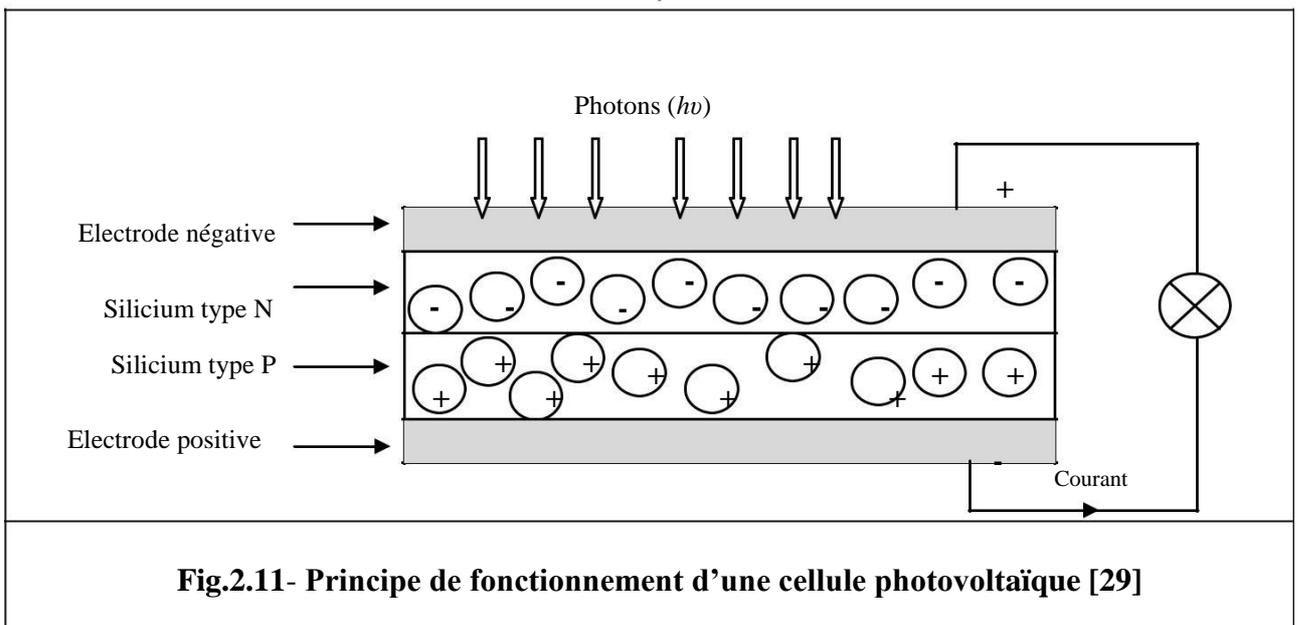


Fig.2.11- Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [29]

Il existe des composés semi-conducteurs tels que l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de Cadmium (CdTe) [20].

2.6.4- 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 La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. 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 poly cristallin [8].



Les cellules monocristallines

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. Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles.



Les cellules Poly cristallines

Le silicium Poly cristallin est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. 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%.



(a)



(b)

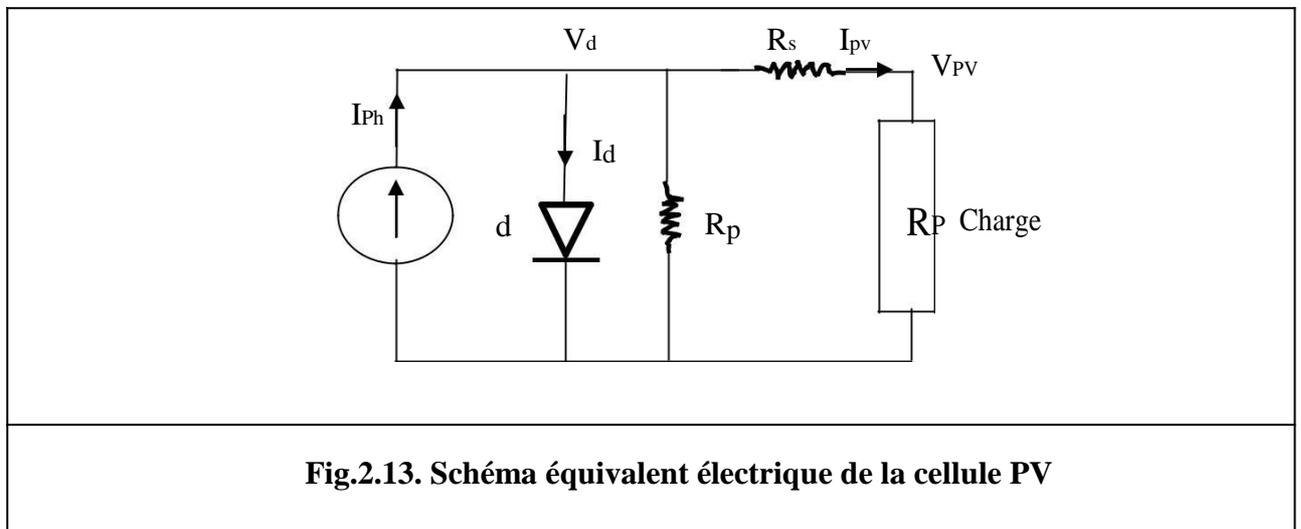
Fig.2.12. Photos de cellules monocristalline (a) et Polycristaline (b).

➤ **Cellules amorphes**

Les cellules au silicium amorphe sont des cellules à couche mince, c'est-à-dire qu'elles sont fabriquées en déposant une fine couche de silicium sur un support (ou "substrat").

2.6.5- Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique I(V) du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par le circuit équivalent bien connu de la figure (2.13). Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances séries R_s et parallèle (shunt) R_p pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule [32].



Selon le schéma de la figure (2.13) on peut écrire

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{N_s A K T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p} \quad (2-12)$$

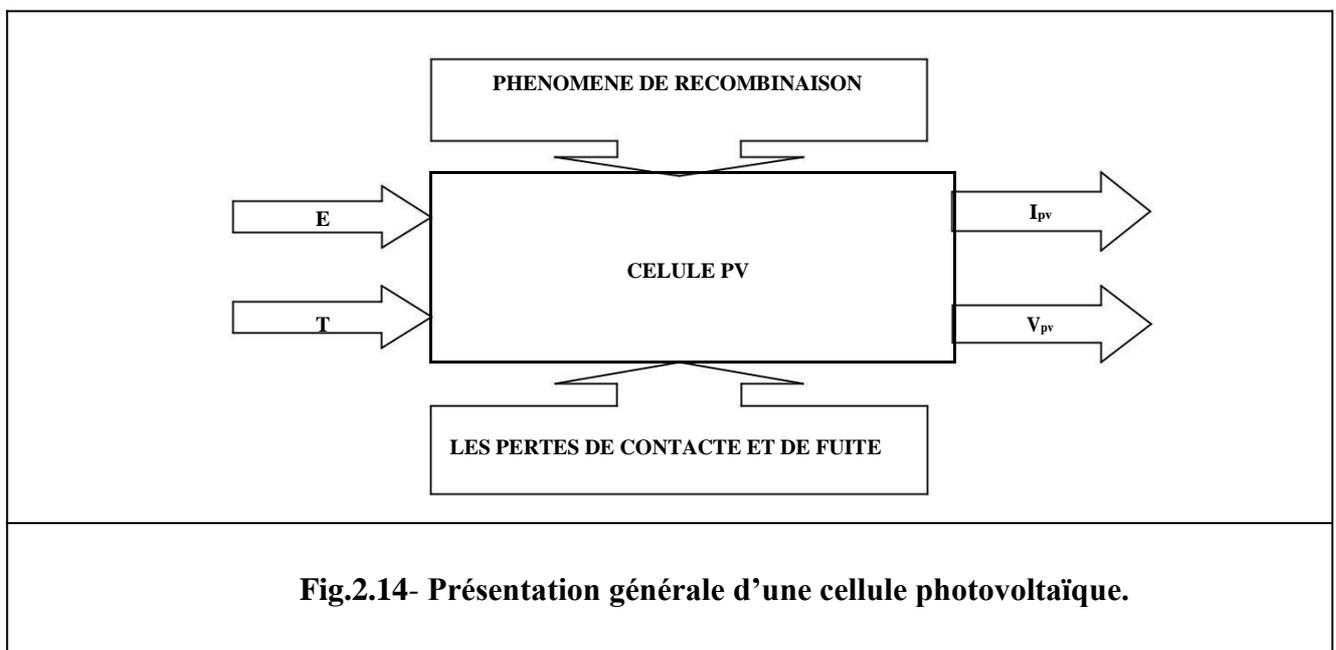
Où I_0 est le courant de saturation, K est la constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K), T est la température effective des cellules en Kelvin(K), q est la charge de l'électron ($e=1,6 \cdot 10^{-19}$ C), A est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < A < 3$), I_{pv} est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur, V_{pv} est la tension aux bornes de cette même cellule, I_{ph} est le photocourant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court circuit), R_p est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction, R_s est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions [20].

2.6.6- Paramètres d'une cellule photovoltaïque.

Quatre paramètres majeurs permettent de caractériser une cellule photovoltaïque [33]:

- Courant de court-circuit I_{CC} .
- Tension en circuit ouvert V_{CO} .
- Facteur de forme FF.
- Le rendement de conversion d'énergie η .
- Le kilo watt crête (kWc) : C'est l'unité qui définit la puissance d'une cellule (générateur) PV aux conditions de Test Standard (STC) ($1000W.m^{-2}$ et $25^{\circ}C$).

La valeur des paramètres ci-dessus dépend le niveau d'éclairement et de la température de la cellule.



Le panneau photovoltaïque est donc à considérer comme une source de puissance. On s'aperçoit alors de l'existence d'un point P_m où la puissance se trouve être maximale.

Selon le schéma ci dessus d'une cellule PV, on peut diviser la caractéristique en 03 zone, une zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{CC} , une zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{CO} et une zone (c) où l'impédance du générateur varie rapidement [33].

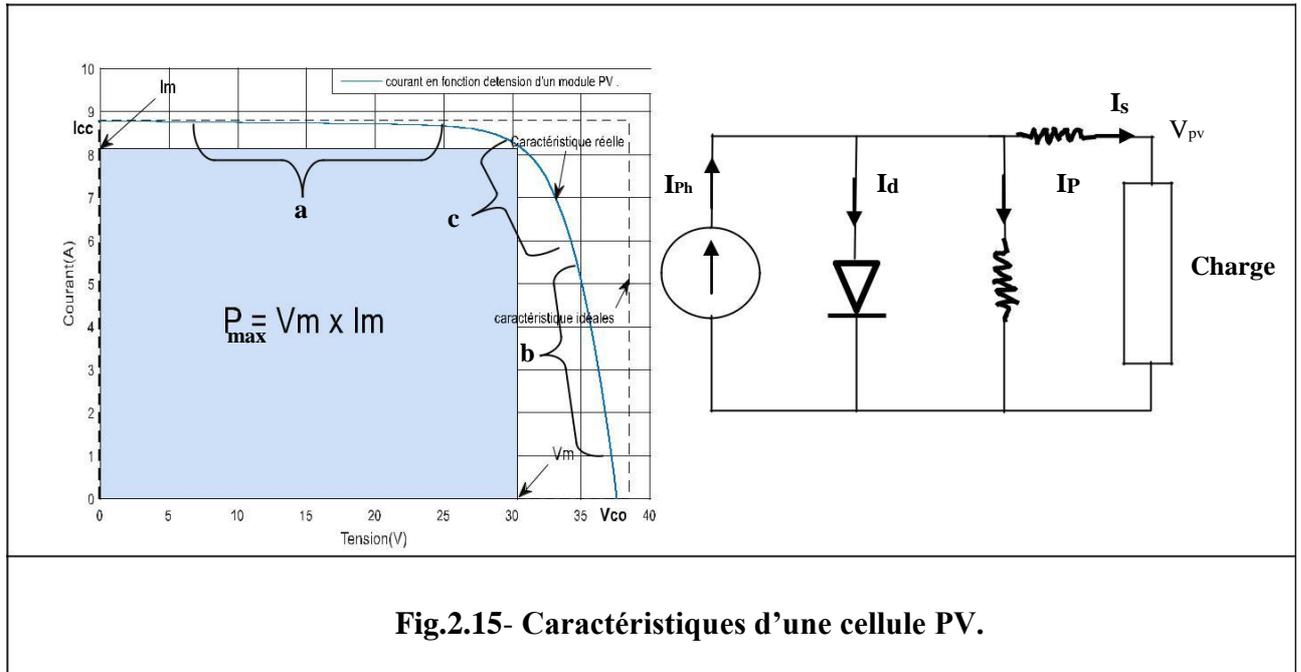


Fig.2.15- Caractéristiques d'une cellule PV.

➤ **Courant de court-circuit, I_{cc}.**

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant V=0 dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. On peut déduire le courant de court-circuit à partir l'équation (2-12) tel que:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{I R_{pv}}{N_s A K T}\right) - 1 \right] - \frac{I R_s}{R_p} \tag{2-13}$$

Pour la plupart des cellules dont la résistance série est faible, on peut négliger le terme

$$I_0 \left[\exp\left(\frac{I R_{pv}}{N_s A K T}\right) - 1 \right] \text{ devant } I_{ph}, \text{ donc le courant de court-circuit devient.} \tag{2-14}$$

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_p}}$$

➤ **Tension à circuit ouvert, V_{co}.**

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul.

Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et

Varie peu avec l'intensité lumineuse [8].

$$V_{c0} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad (2-15)$$

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement :

Régime de faible éclairement : dans ce cas $I_{ph} \ll I_0$, alors d'après l'équation (2-15)

$$V_{c0} \approx \frac{KT}{q} \frac{I_{ph}}{I_0} \quad (2-16)$$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule. La formule précédente peut s'écrire aussi

$$V_{c0} = R_0 I_{ph} \quad \text{en posant } R_0 = \frac{KT}{qI_0}$$

Où 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 $I_{ph} \gg I_s$

Dans ce cas selon l'équation (2-15) la tension à vide obtient

$$V_{c0} = \frac{KT}{q} \ln \frac{I_{ph}}{I_0} \quad (2-17)$$

C'est le domaine du comportement logarithmique voir la figure (2.14).

Il est important de remarquer que cette tension augmente avec le log de I_{ph} , donc avec le ln de l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme KT/q . En effet, le courant de saturation, I_{sat} dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction et il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme KT/q . aussi tension de circuit ouvert V_{c0} baisse avec la température, ce qui est important dans le dimensionnement des systèmes [19].



Facteur de forme FF:

De son nom anglo-saxon le plus utilisé Fill Factor, le facteur de forme est le rapport entre la puissance maximale P_{max} qui peut être délivrée par la cellule au produit de la tension en circuit

ouvert (V_{co}) et du courant de court-circuit (I_{cc}).

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{cc} V_{co}} \quad (2-18)$$



Rendement de conversion η .

Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la Cellule P_{\max} et la puissance lumineuse incidente P_{in} [33].

$$\frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{P_{in}} \quad (2-19)$$

P_{in} : Puissance incidente = P solaire = 1000 W/m^2

La densité de puissance incidente égale à $\frac{P_{in}}{A}$

A : section de la cellule

Selon l'équation (2-19) on peut améliorer le rendement par l'augmentation de facteur de forme, tension à vide ou le courant de court-circuit.

2.7- PANNEAU SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module photovoltaïque [7].

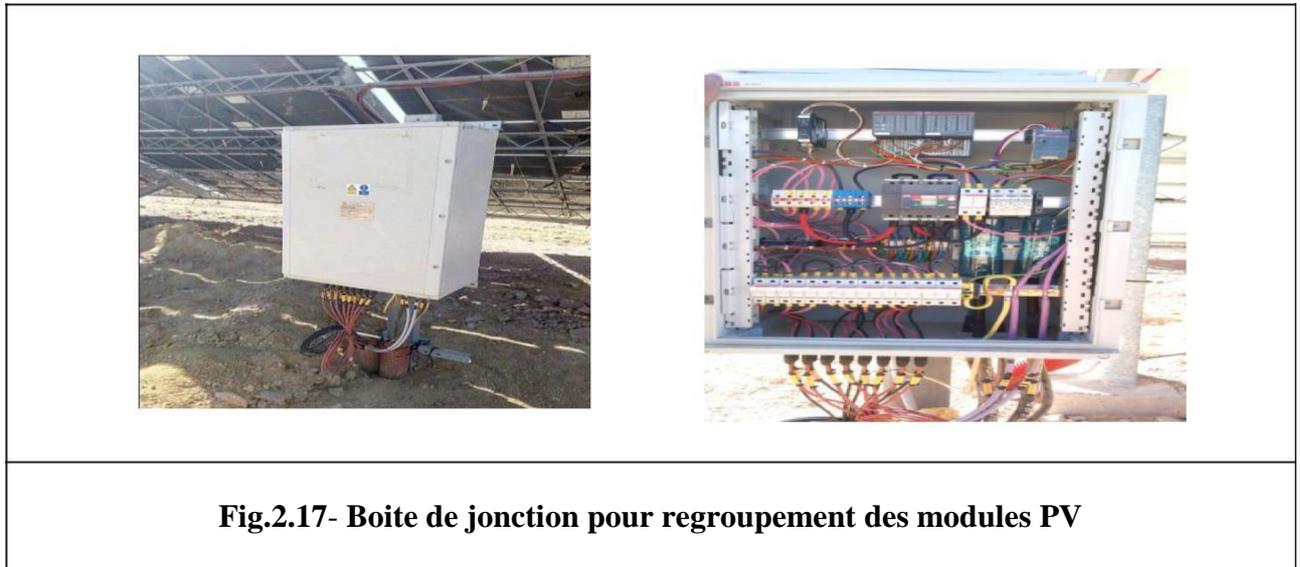


Fig.2.16- Panneaux photovoltaïques

2.8- BOITE DE DERIVATION D'UN PANNEAU SOLAIRE PV

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce qui fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui les regroupe. Cette boîte de dérivation a le rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.

La figure ci-dessus représente une boîte de raccordement reliant 08 modules PV.



2.9- SYSTEME DE CONVERSION

L'énergie utilisée en industrie et chez les particuliers provient particulièrement du réseau électrique triphasé. Dans un système photovoltaïque, les convertisseurs ont pour fonction de charger les batteries et de transformer le courant continu en courant alternatif et vice-versa. Les convertisseurs souvent rencontrés sont les redresseurs, onduleurs et hacheurs. Les redresseurs dans les systèmes photovoltaïques réalisent la conversion CA/CC pour charger les batteries.

Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner pour autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec une source CA.

Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leurs propres fréquences à la charge. Les onduleurs non autonomes exigent une source à CA pour fonctionner, et il y a les onduleurs qui assurent les deux régimes de fonctionnement (autonome ou parallèle).

Les hacheurs permettent de réaliser la conversion CC/CC comme exemple adapté la tension entre deux sources.

2.10- SYSTEME DE STOCKAGE

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. L'opération de stockage d'énergie est toujours associée à l'opération inverse consistant à récupérer l'énergie stockée (le déstockage). Ces deux opérations de

stockage/déstockage constituent un cycle [35]. Dans une batterie au plomb-acide ou au nickel-cadmium, les réactions électrochimiques créent des composés solides qui sont stockés directement sur les électrodes où ils se sont formés. La masse qu'il est possible d'accumuler localement est forcément limitée. Mais pour contourner cette limitation, des batteries dites à circulation d'électrolyte ont été conçues (figure 1.2.a). Les composés chimiques responsables du stockage de l'énergie sont liquides et restent en solution dans l'électrolyte. Les électrolytes utilisés sont à base de ZnBr (zinc-brome), NaBr (sodium-brome), VBr (vanadium-brome) et PSB (Bromure de polysulfure) [35].

2.11- CARACTERISTIQUES PRINCIPALES D'UNE BATTERIE.

➤ **Capacité en Ampère heure :**

Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant. Théoriquement, par exemple, une batterie de 200 Ah peut fournir 200 A pendant une heure, ou 50 A pendant 4 heures, ou 4 A pendant 50 heures.

➤ **Rapports de chargement et déchargement.**

Si la batterie est chargée ou est déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer. Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite [35].

➤ **La durée de vie de la batterie.**

Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent.

➤ **Profondeur de décharge.**

La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé un cycle de charge/décharge.

➤ **Tension d'utilisation.**

C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

➤ **Le rendement d'une batterie.**

C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.

➤ **Le taux d'autodécharge.**

L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

2.12- CONCLUSION

Les photopiles ou cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, poly cristalline, ou monocristalline.

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des impuretés) sont substitués à des atomes de silicium dans un réseau.

Dans ce chapitre, nous avons vu un aperçu sur le gisement solaire et ses applications dans la production d'énergie électrique, où nous avons étudié brièvement le phénomène de l'effet photovoltaïque ainsi que le modèle mathématique et la représentation graphique d'une façon générale d'une cellule photovoltaïque.

Aussi nous avons vu les éléments constituant un système photovoltaïque (boite de raccordement, convertisseurs, batterie de stockage...etc.).

3- MODELISATION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

3.1- INTRODUCTION

Un générateur photovoltaïque est un module photovoltaïque qui fonctionne comme un générateur électrique de courant continu constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques montées entre elles électriquement soit en série ou en parallèles afin d'obtenir des caractéristiques tel que la tension, le courant et la puissance [38].

Dans ce chapitre, nous allons faire une modélisation d'un panneau photovoltaïque en étudiant leurs différentes caractéristiques ainsi que les paramètres agissant sur son fonctionnement comme la température et l'ensoleillement.

3.2- GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE GPV.

La cellule PV est l'élément essentiel pour la construction d'un générateur PV, mais elle est destinée à produire une petite puissance de quelques watts. Dans la réalité on a besoin de grandes puissances, c'est pour cela on doit rassembler plusieurs cellules identiques pour former un panneau photovoltaïque, ainsi qu'un générateur photovoltaïque. La figure (3.1) représente un rassemblement typique de cellule PV au générateur PV [36] [37].

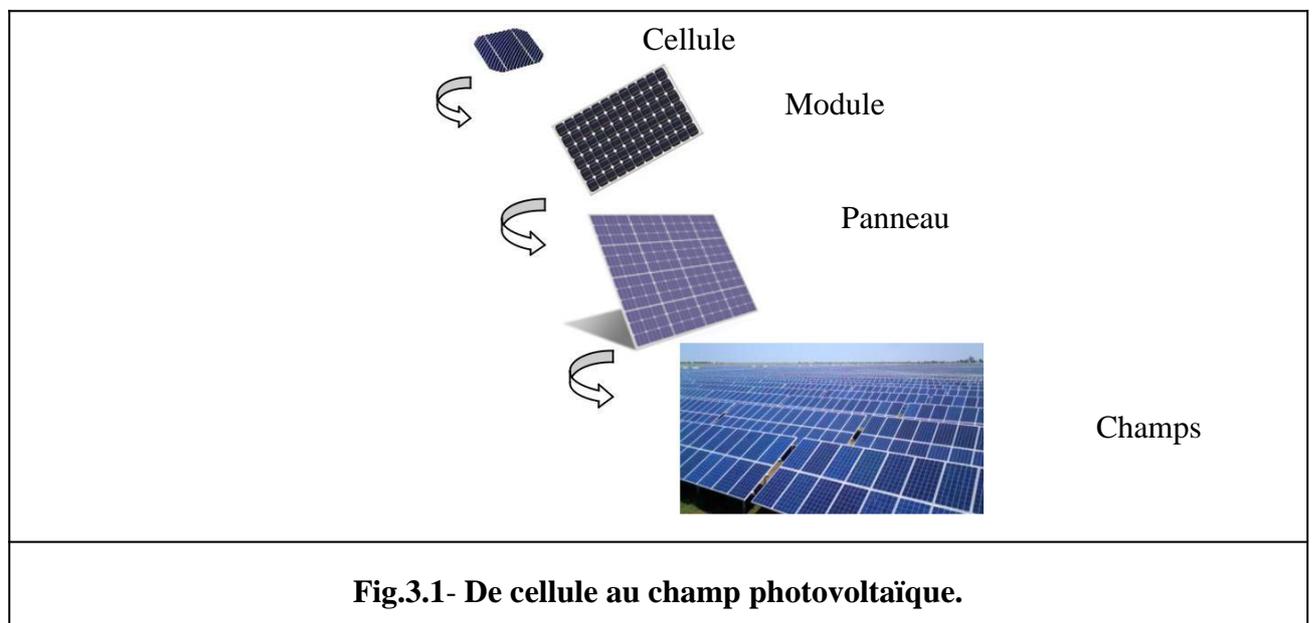


Fig.3.1- De cellule au champ photovoltaïque.

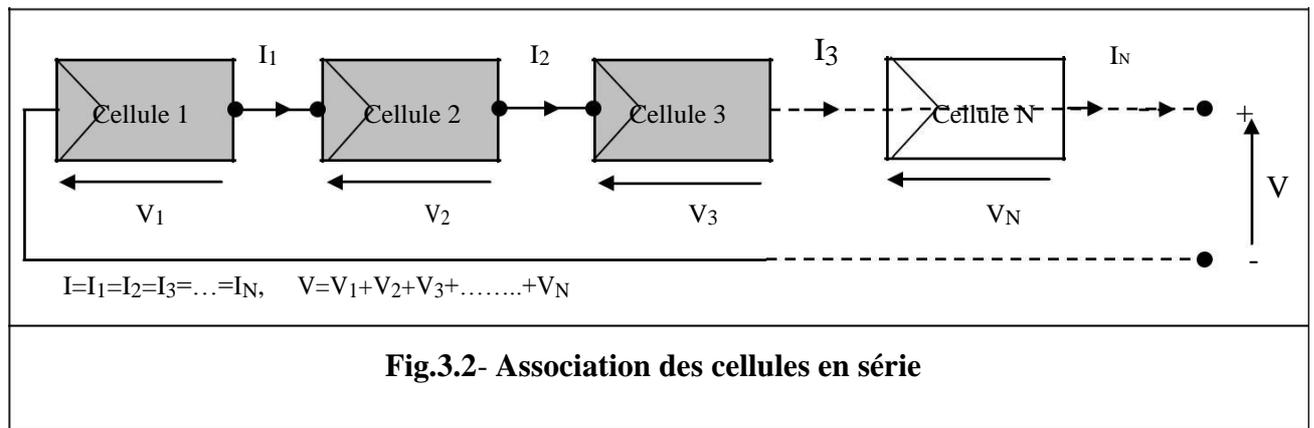
L'interconnexion des modules entre eux, en série ou en parallèle, pour obtenir une puissance plus grande, définit la notion de générateur photovoltaïque GPV.

3.3- MONTAGE DES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES.

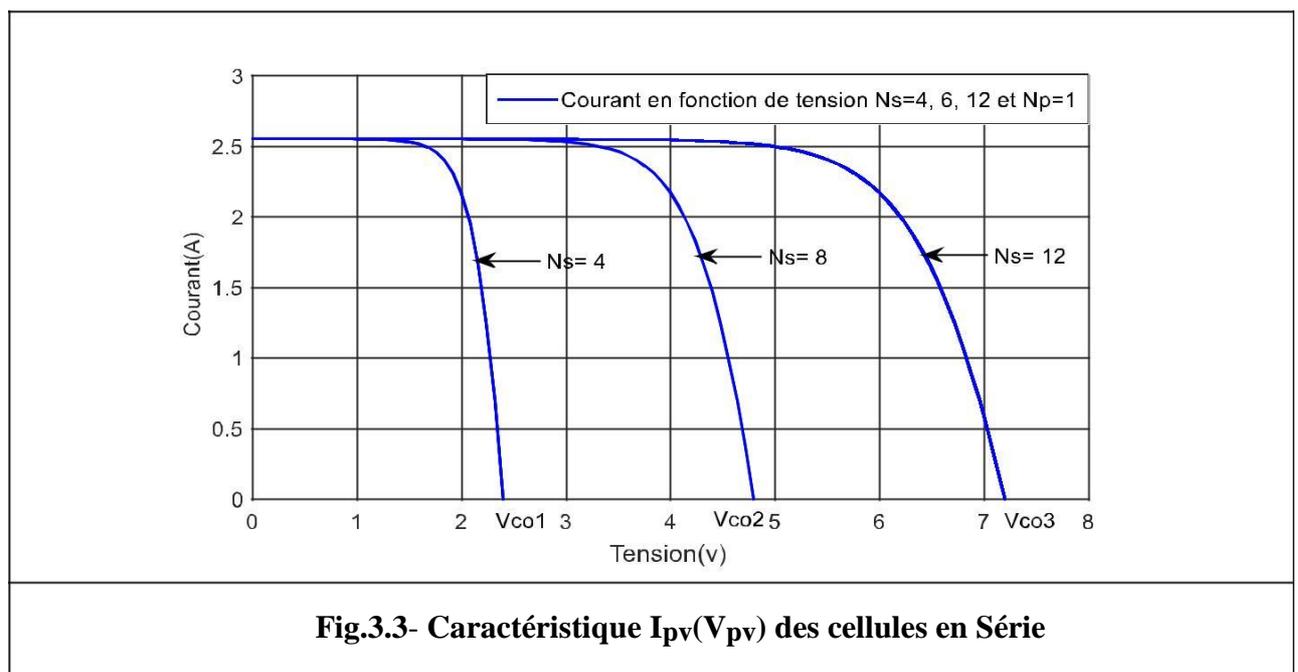
Les cellules photovoltaïques peuvent être montées entre eux en série ou en parallèle selon les besoins des applications visées.

3.3.1- Montage série des cellules.

Dans le cas des cellules en série, les tensions s'ajoutent et les courant traversant le panneau sont identiques. C'est pourquoi pour constituer un panneau photovoltaïque, on doit associer des cellules identiques ayant les mêmes caractéristiques. La figure 3.2 représente N cellules associées en série.

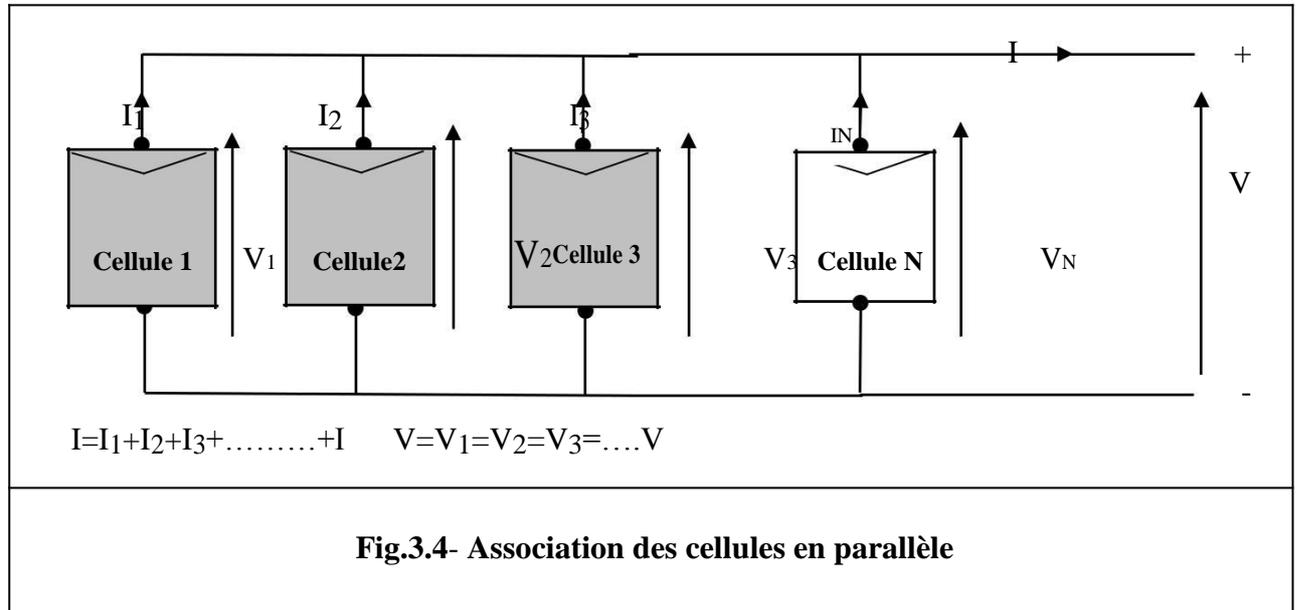


La figure (3.3) représente la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ des cellules montées en série. On remarque que pour des cellules associées en série, la valeur de tension est la somme des tensions de chaque cellule.

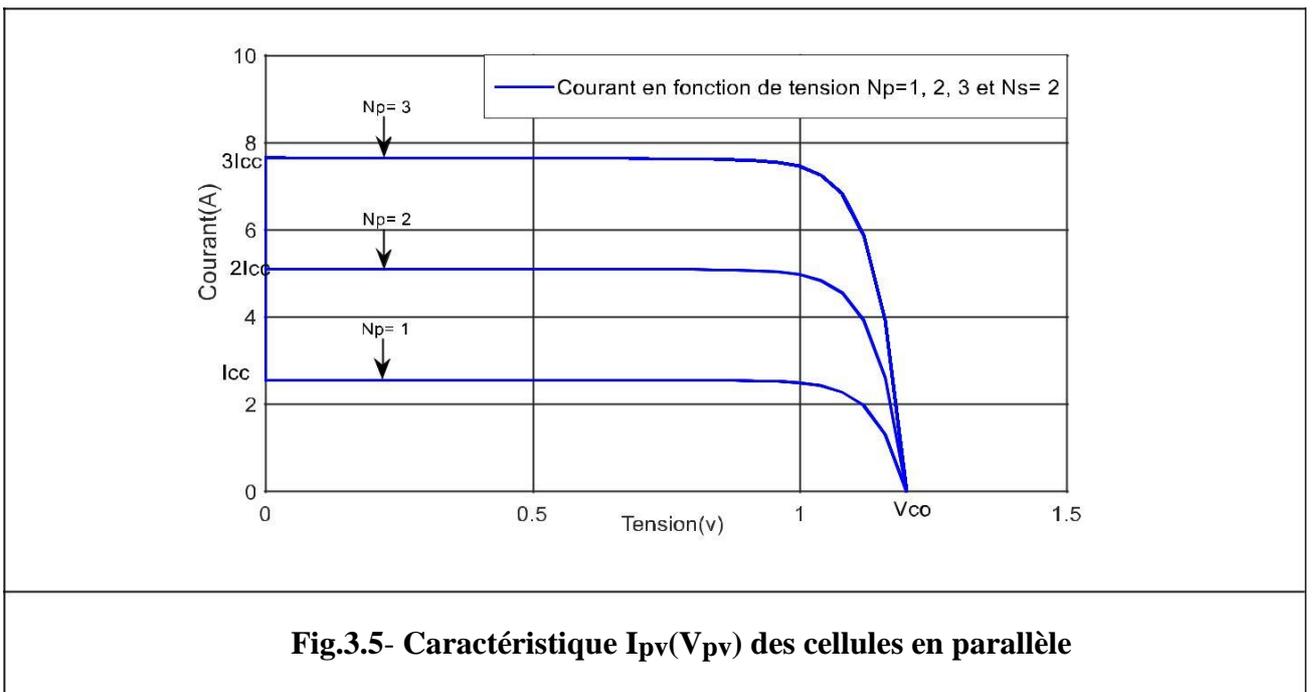


3.3.2- Montage parallèle des cellules.

Lorsque les cellules sont raccordées en parallèles, les courants s'additionnent et la tension restera constante. En fait, la mise en parallèle des cellules est utilisée pour le raccordement des panneaux PV pour avoir un GPV plus puissant.



La figure (3.4) représente la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ du module PV avec des cellules en parallèle. On remarque que pour un GPV ayant des cellules montées en parallèles, les tensions sont égales et les courants s'additionnent.



3.4- PROTECTION DES GPV.

Puisque les cellules sont associées en série dans chaque module constituant le GPV, le courant total du module est imposé par la cellule la plus faible d'éclairement. Alors qu'on a une cellule n'est pas exposée au rayonnement, le courant de l'ensemble tend vers zéro ampère. Dans ce cas, la cellule masquée devient réceptrice de tous les courants résultant et elle se met donc à chauffer où il est connu par le nom hot-Spot [36]. Il y a deux types de protections classiques sont utilisées.

3.4.1- Diode Anti-Retour.

Le rôle de la diode Anti-Retour est d'empêcher les courant inverses créés par l'ombrage d'une ou plusieurs cellules en série dans une installation PV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont raccordés en parallèles.

3.4.2- Diode By-pass.

Dans la figure 3.6 en fonctionnement normal, la diode By-pass sera polarisée en inverse et se comporte comme un circuit ouvert. Toutefois, une cellule est polarisée inversement à cause d'un court-circuit entre les cellules, la diode By-pass conduit tout en laissant le courant des 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.

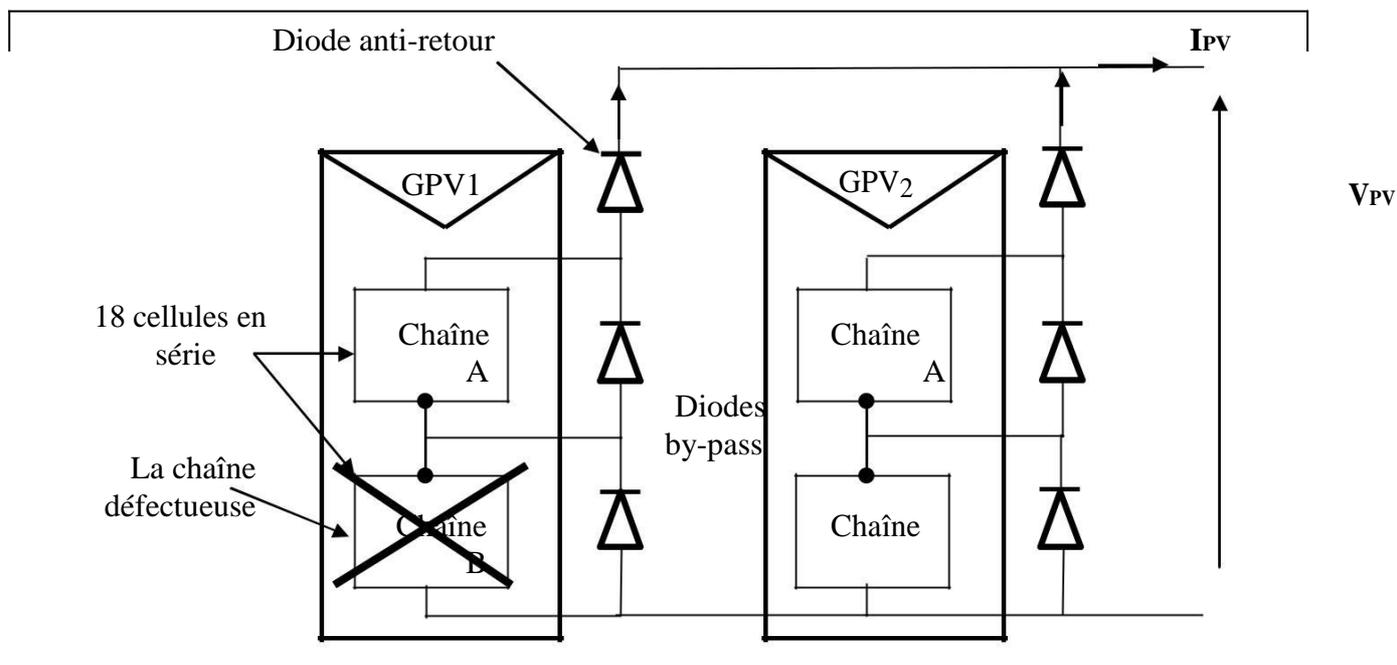


Fig.3.6 Les deux type de protection des installations PV

3.5- CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES D'UN MODULE PV.

Les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque sont données dans le tableau suivant :

Tab.3.1- Caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque	
Caractéristique	Notion de la caractéristique
Puissance maximale P_{max}	Puissance maximale produit par le module PV en Watt
La tension à P_{max} (V_m)	Tension qui correspond à la puissance maximale en volt
Le courant à P_{max}	Courant qui correspond à la puissance maximale en Ampère
Le courant de court-circuit I_{cc}	Courant quand le circuit du module est court-circuité
Tension à circuit ouvert V_{co}	Tension de sortie quand on ouvre la sortie du module
Coefficient de température de I_{cc}	Cela signifie la variation du I_{cc} en fonction de Température
Coefficient de température de V_{co}	Cela signifie la variation de $V_{co}(T)$.
Coefficient de température de P_{max}	Cela signifie la variation de $P(T)$.
NOCT	Température nominale de fonctionnement de la cellule

3.6- MODELE D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.

Le modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque se base sur la modélisation de l'élément de base constituant ce dernier c'est à dire la cellule photovoltaïque.

3.6.1- Circuit équivalent et modèles mathématique.

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque représenté un générateur de courant I_{pv} monté en parallèle avec une diode, deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma. ces résistances ont un influence sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ de la cellule [20].

- Résistance Série R_s : C'est la résistance interne de la cellule qui représente la résistance du semi-conducteur utilisé et les résistances de contact.
- Résistance Parallèle ou Shunt : C'est la résistance due à un courant de fuite au niveau de la jonction, donc elle dépend de la façon de réalisation de la cellule.

La figure (3.7) représente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

A partir ce schéma électrique on peut faire sortir les différentes formules caractéristiques d'une cellule, d'un module ou d'un panneau PV ainsi que sa modélisation.

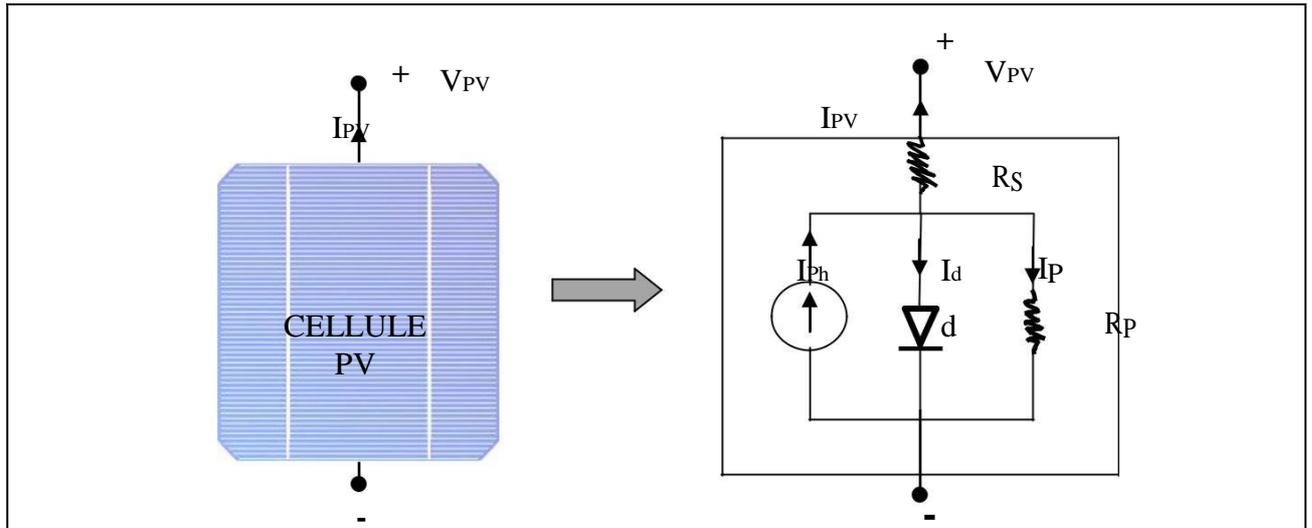


Fig.3.7- Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

En appliquant la loi du Kirchhoff sur le circuit du schéma équivalent d'une cellule PV, on trouve :

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_d - I_P \tag{3-1}$$

Où ;

$$I_P = \frac{V}{R_P} \tag{3-2}$$

$$V_{pv} = V_d - R_s \times I_{pv} \tag{3-4}$$

Dans le cas d'un module constitué de Ns cellules on obtient :

$$V_{pv} = N_s \times (V_d - R_s \times I_{pv}) \tag{3-5}$$

I_{pv} : Courant de la sortie de la cellule ou le GPV.

I_{Ph} : Photocourant ou le courant généré par l'éclairement.

I_P : Courant traversant la résistance parallèle.

V_d : Tension aux bornes de la diode.

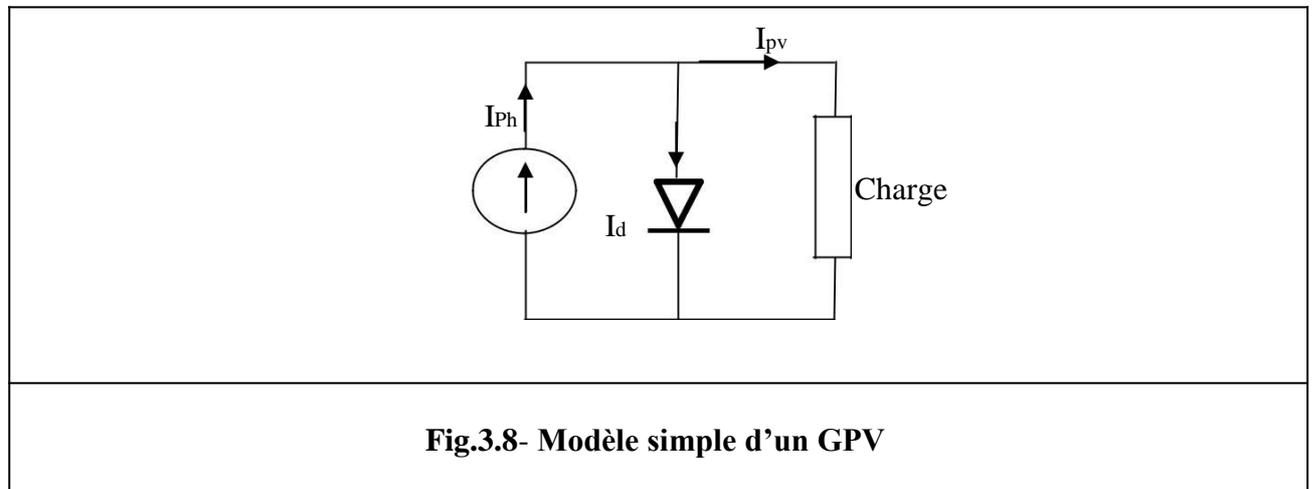
R_s : Résistance série

R_p : Résistance parallèle.

3.6.2- Courant d'un GPV.

➤ **Cas d'un modèle simple.**

Le schéma le plus simple d'une cellule PV dans le cas idéal est présenté par la figure ci-dessous.



Si on prend le cas le plus simple (circuit idéal) d'un générateur GPV exposé au rayonnement du soleil comme il est illustré dans la figure (3.8), on trouve :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \tag{3-6}$$

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_d}{KT}\right) - 1 \right] \tag{3-7}$$

Si on considère dans le circuit ci-dessus le courant $I_{pv} = 0$ donc $I_{ph} = I_d$ alors

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} - 1\right) \tag{3-8}$$

V_{co} : la tension en circuit ouvert.

➤ **Cas d'un circuit simple avec résistance parallèle R_p**

Le GPV est très sensible au problème de l'ombre qui peut survenir sur une ou plusieurs cellules. Il sera alors nécessaire d'ajouter au modèle une résistance parallèle R_p qui représente les fuites entre le dessus et le dessous de la cellule et aussi les courants parasites à l'intérieur du matériau par les irrégularités ou les impuretés [36].

Dans ce cas l'équation (3-1) devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - R_{pv}^{-1} \frac{V}{P} \quad (3-9)$$

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_0 \times \left(e^{\frac{qV_d}{KT}} - 1 \right) - \frac{V}{R_P} \quad (3-10)$$

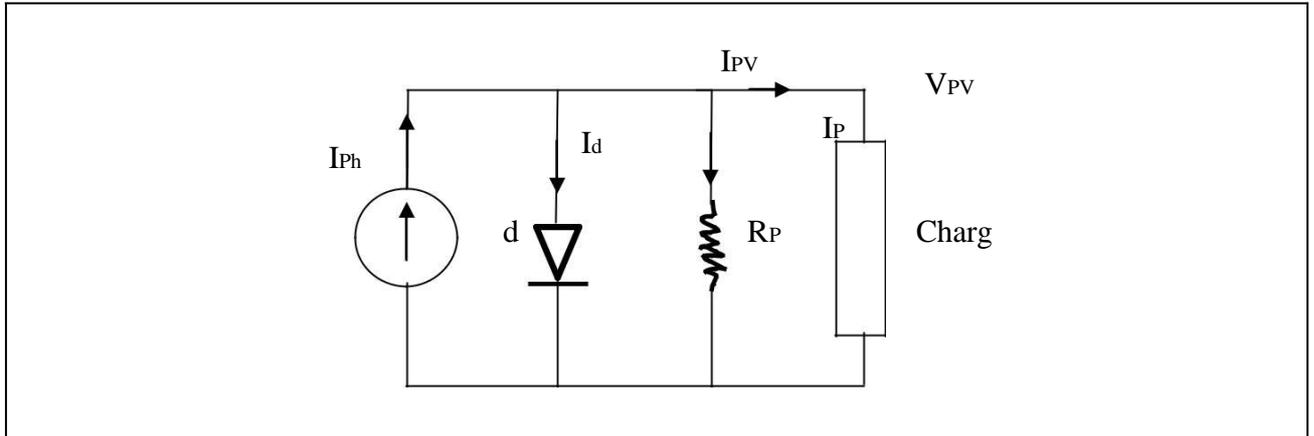


Fig.3.9- Modèle simple d'un PV avec une résistance en parallèle.

➤ **Cas d'un modèle avec une résistance en série.**

Si on prend le schéma équivalent d'un modèle simple en présence de la résistance série c'est-à-dire on exprime uniquement les pertes dues aux contacts et liaisons entre cellules et les conducteurs, le modèle devient comme il est illustré dans la figure ci-dessous.

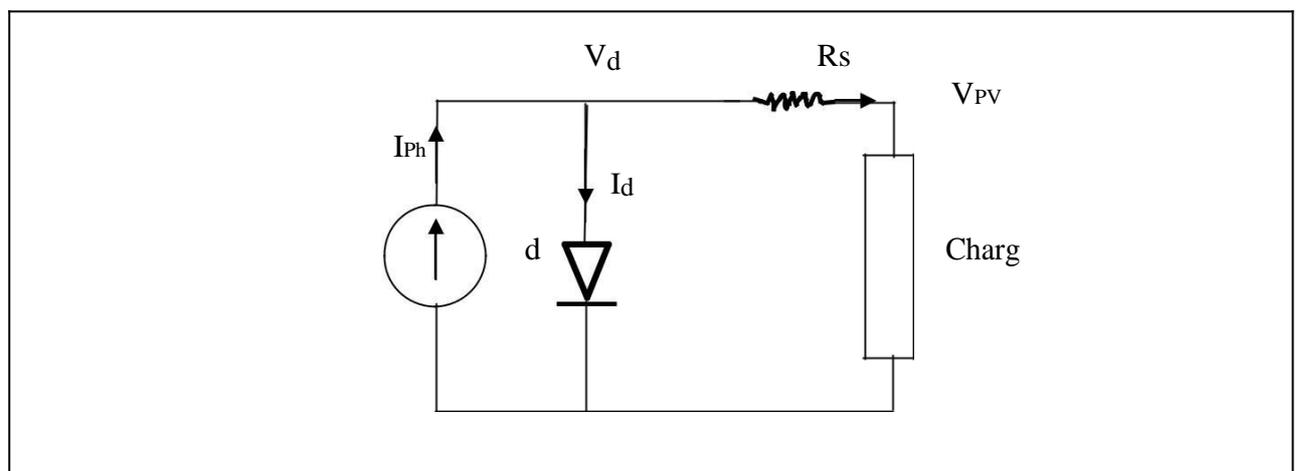


Fig.3.10- Modèle simple d'un PV avec une résistance en parallèle.

Avec une résistance en série uniquement l'équation (3-1) devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (3-11)$$

Avec

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{q \times (V_{pv} + R_s \times I_{pv})}{KT}} - 1 \right) \quad (3-12)$$

D'où ;

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q \times (V_{pv} + R_s \times I_{pv})}{KT}} - 1 \right) \quad (3-12)$$

➤ Cas d'un modèle avec résistance série et parallèle.

Le modèle en présence de deux résistances représente le cas réel. Ce circuit équivalent sera modélisé dans la partie de simulation. Le schéma équivalent complet est représenté dans la figure ci-dessous.

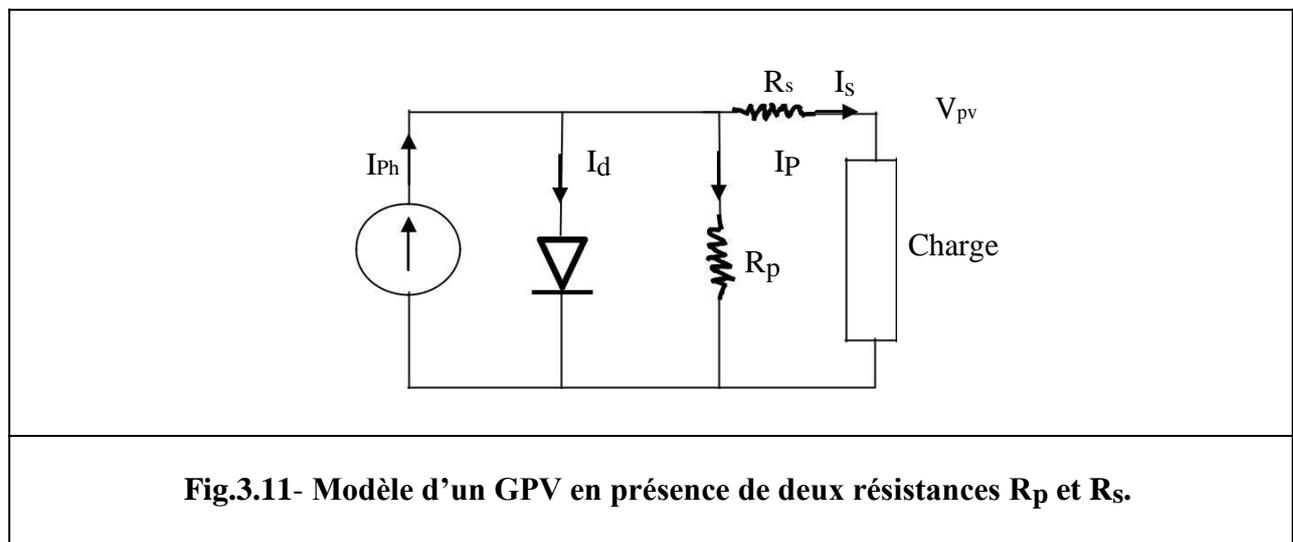


Fig.3.11- Modèle d'un GPV en présence de deux résistances R_p et R_s .

Dans le cas réel d'un GPV, l'équation (3-1) devient une formule qui relie le courant d'entrée à la tension de sortie comme le suivant [21]:

En remplaçant le courant I_d traversant la diode, I_p traversant la résistance parallèle et I_s le courant circulant dans la résistance série par ses expressions on obtient [39]

$$I_{pv} = \left(\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{R_p} \right) - \frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{R_p} \quad (3-13)$$

$$I_{ph} = \left(\frac{E}{E_{ref}} \right) \times (I_{cc} + K_i \times (T - T_{ref})) \quad (3-14)$$

$$I_0 = I_{sr} \times \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \times \left(e^{\left(\frac{qE_g}{AK} \right) \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \right) \quad (3-15)$$

$$I_{sr} = \frac{I_{CCref}}{\left[\frac{qV}{e^{N_s AK T}} - 1 \right]} \quad (3-16)$$

I_{pv} : Courant à la sortie du GPV.

I_{ph} : Courant-photon délivré par l'éclairement en A.

V_{pv} : Tension de la sortie du GPV en Volt.

R_s, R_p : Résistances série et parallèle respectivement en Ω .

ac : le potentiel thermique; $ac = N_s \cdot K \cdot A \cdot T$.

I_0 : Courant de saturation de la diode.

A : coefficient d'idéalité de la cellule dépendant du matériau.

q : Charge électrique élémentaire $1.607 \cdot 10^{-19}$ C

K : Constant de Boltzmann = $1.3806503 \cdot 10^{-23}$ J/K .

T : Température de la cellule en degré Kelvin.

T_{ref} : Température dans les conditions normale en degré kelvin ($T_{ref} = 298^\circ K$).

E, E_{ref} : Eclairement réel et éclairement dans les conditions normales.

I_{sr} : Courant de saturation réversible.

A partir les équations (3-13)...(3-16) on peut faire la simulation de notre générateur photovoltaïque dans le chapitre de simulation et commentaires (voir 4^{ème} chapitre).

3.7- INFLUENCE DES PARAMETRES SUR LA COURBE $I_{pv}(V_{pv})$, $P_{pv}(V_{pv})$.

3.7.1- Influence de la température et de l'éclairement sur la courbe $I_{pv}(V_{pv})$.

La température T et l'éclairement E ont un impact direct sur les performances d'une cellule photovoltaïque comme illustre la figure (3.13). Quand la température des cellules augmente la tension de circuit ouvert diminue sensiblement tandis que le courant de court-circuit augmente légèrement. Alors on peut remarquer que les cellules PV ont de meilleure performance dans un environnement froid avec ciel dégagé, au contraire d'un environnement chaud.

Pour les cellules en silicium cristallin, V_{co} baisse d'environ 0.37% pour chaque degré Celsius de plus, I_{cc} augmente de 0.05% pour les mêmes conditions [36].

La température du GPV dépend non seulement de la température ambiante mais aussi des effets de l'irradiation de la cellule. Puisque seule une petite fraction de l'insolation qui touche le module est convertie en électricité, la plupart de l'énergie incidente est absorbée et convertie en chaleur.

Le courant généré par la lumière de la cellule PV (I_{ph}) dépend directement de l'irradiation solaire est également influencé par la température comme il est mentionné dans l'équation (3-14) [40].

Selon figure (3.12), on remarque que la variation de la température de la cellule ne change pas de la forme de caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$, mais le changement consiste dans les valeurs de I_{cc} , V_{co} , I_m et V_m [40]. En effet, si la température augmente, le photo-courant augmente et par conséquent le courant I_{pv} , ce qui engendre une diminution de la tension du circuit ouvert V_{co} figure (3.12). L'augmentation de la température se traduit aussi par la diminution de la puissance maximale P_{max} disponible [41].

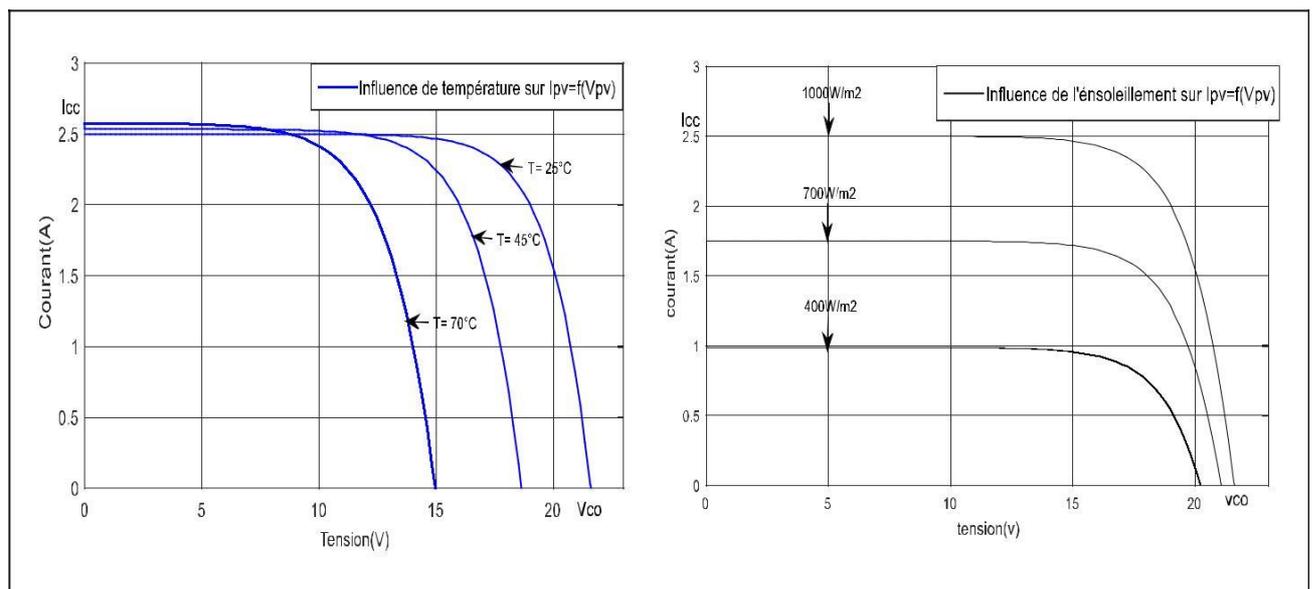


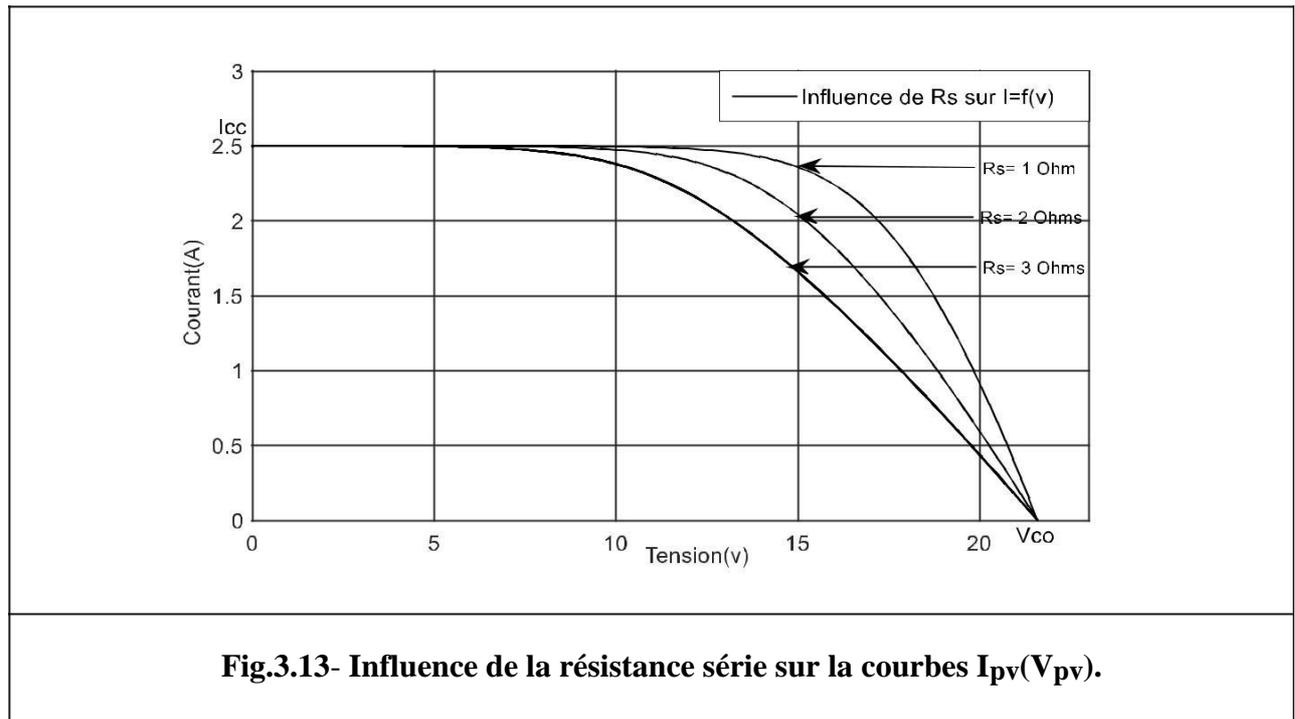
Fig.3.12- Influence de la température et l'éclairement sur la courbe $I_{pv}(V_{pv})$.

3.7.2- Influence des résistances parasite (R_s et R_p) sur la courbe $I_{pv}(V_{pv})$.

Les deux résistances R_s et R_p vont influencer sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ de la cellule solaire en particulier sous éclairage et température constant [40].

➤ Influence de la résistance série R_s .

L'effet de la résistance série R_s sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ de la cellule solaire sous éclairage est illustré sur la figure (3.12) ci-dessous.



On remarque que la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le courant du court-circuit (I_{cc}) ne sont pas modifiés, mais la caractéristique se déforme très rapidement quand on change R_s . Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ dans la zone où la cellule fonctionne comme une source de tension lorsque R_s augmente (V_{co}) et I_{cc} ne se change pas).

L'augmentation de la résistance série a un effet réductif considérable sur le point de fonctionnement et le facteur de forme (FF) de la cellule [36].

$$\Delta V = I_{pv} \times R_s \quad (3-17)$$

➤ Influence de la résistance parallèle.

La figure 3.13 ci-dessous illustre l'effet de la résistance parallèle R_p sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ de la cellule photovoltaïque sous éclairage et température sont constants.

On remarque que la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le courant du court-circuit (I_{cc}) ne sont pas modifiés; mais la caractéristique se déforme très rapidement, cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de courant (basse tension) [40].

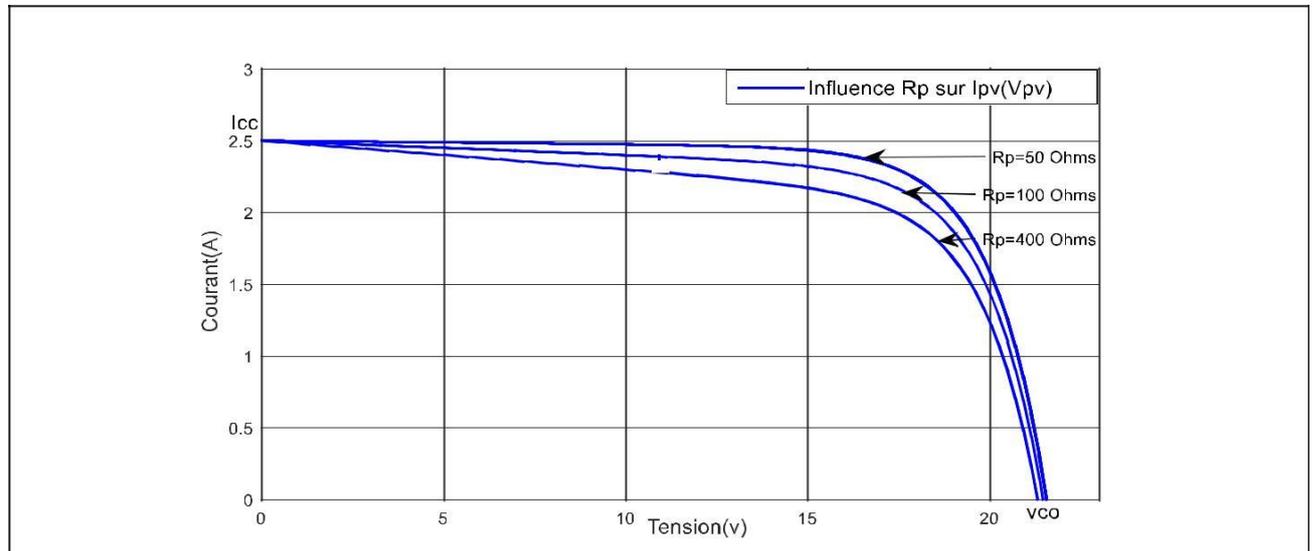


Fig.3.14- Influence de la résistance parallèle sur les courbes $I_{pv}(V_{pv})$ et $P(V_{pv})$.

Selon la figure (3.14) l'augmentation de la résistance en parallèle va diminuer le courant I_{pv} par une valeur de [40] :

$$\Delta I_{pv} = \frac{V}{R_p} \tag{3-18}$$

On remarque que pour les deux cas, on a une perte en puissance.

3.7.3- Influence de l'ombrage sur la courbe $I_{pv}(V_{pv})$.

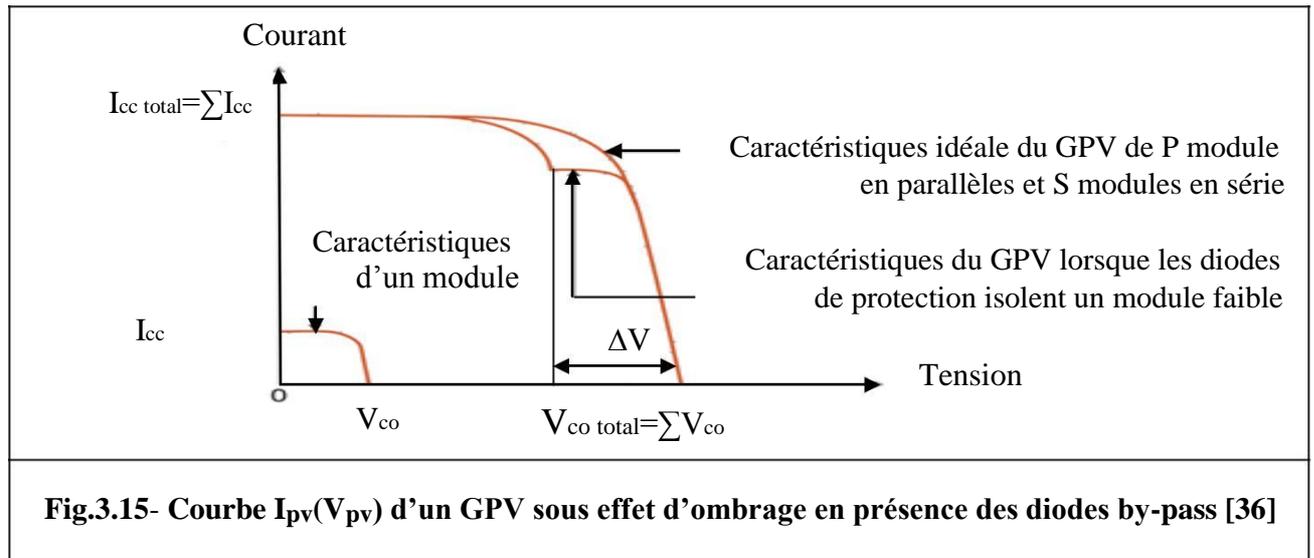
Les sorties d'un GPV peuvent être réduites considérablement quand une partie d'un module est touchée par l'ombre comme il est schématisé dans la figure (3.15).

Le GPV verra une chute de tension ΔV tel que :

$$\Delta V = \frac{V}{N_s} + I_{pv} \times R_p \tag{3-19}$$

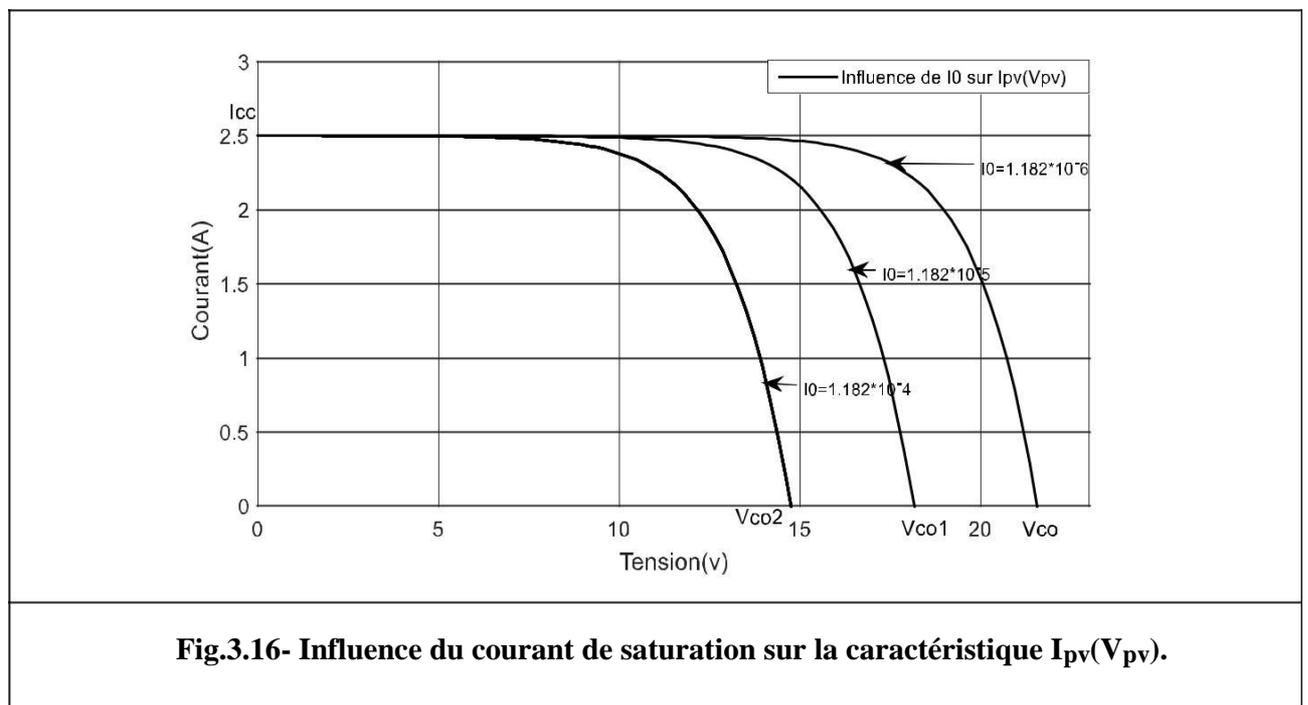
N_s : Nombre des cellules du GPV.

La courbe $I_{pv}(V_{pv})$ se change et devient comme illustre la figure ci-dessous.



3.7.4- Influence du courant de saturation (I_0).

Si on fixe les paramètres du GPV et on prend 03 valeurs pour le courant de saturation, on trouver la courbe ci-après.



Le courant de saturation d'un GPV a une influence sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'un GPV, tel que l'augmentation du courant de saturation provoque la diminution de V_{co} et alors que le courant de court-circuit reste constant.

3.7.5- Influence du facteur d'idéalité (A)

Le facteur d'idéalité a un impact similaire que du courant de saturation, tel que l'augmentation du facteur d'idéalité provoque une réduction de V_{CO} , mais le courant I_{CC} garde la même valeur.

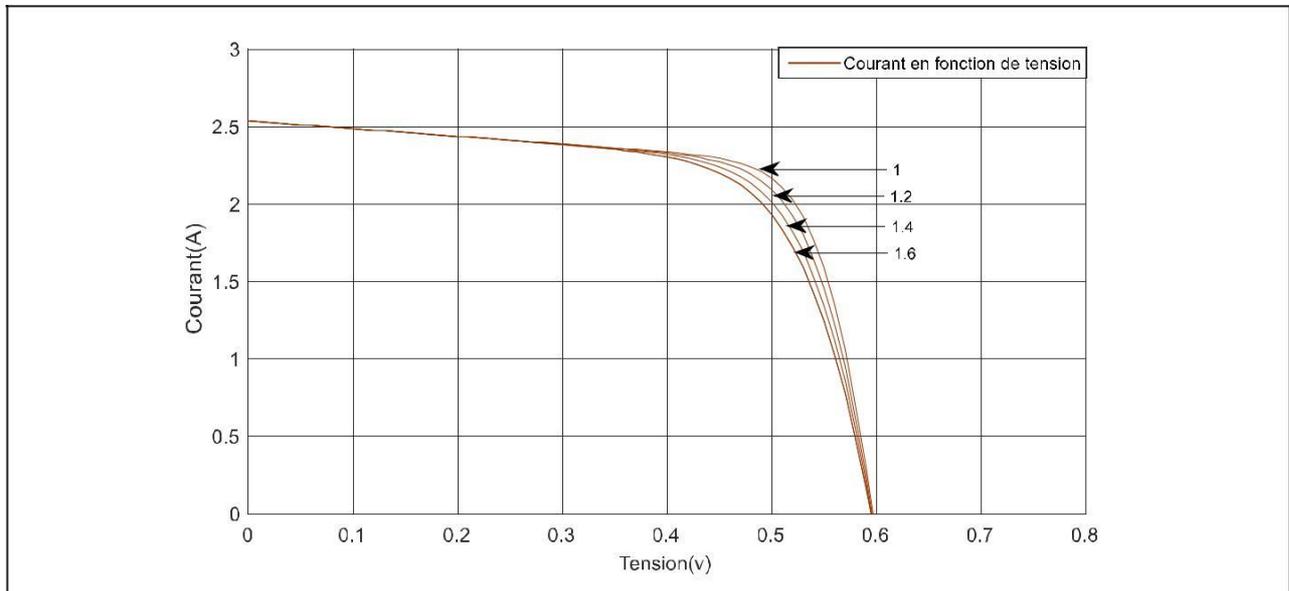


Fig.3.17- Influence du facteur d'idéalité sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$.

3.8- CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons modélisé le générateur photovoltaïque GPV et nous avons vu les différents paramètres influençant sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$, tel que la température, l'ensoleillement, les résistances de parasite, le coefficient d'idéalité, le phénomène d'ombrage, et le courant de saturation.

Dans le chapitre suivant nous nous intéresserons par la partie de simulation par l'environnement Matlab/Simulink du générateur GPV et la discussion des résultats obtenus.

4- RESULTATS DE SIMULATION

4.1- INTRODUCTION

Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure à un volt (tension de jonction P-N).

Pour produire une puissance suffisante, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. L'association en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'augmenter le courant.

Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV ayant des caractéristiques souhaitées selon le besoin [25].

Après la modélisation d'une cellule PV ainsi qu'un GPV dans le chapitre 3, nous allons utiliser ces modèles mathématiques pour la simulation d'un GPV (soit une cellule, un module, un panneau, un générateur ou un champ photovoltaïque) ainsi que nous présenterons et discuterons les résultats obtenus en variant quelques paramètres essentiels comme les facteurs météorologique de l'ensoleillement et de la température de la cellule PV.

Pour simuler ces effets et pour voir l'influence de ces paramètres sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$, nous avons utilisé l'environnement Matlab/Simulink.

Puisque de nombreuses procédures existent déjà dans Matlab, nous avons utilisé Matlab comme logiciel de simulation en utilisant Matlab/Simulink.

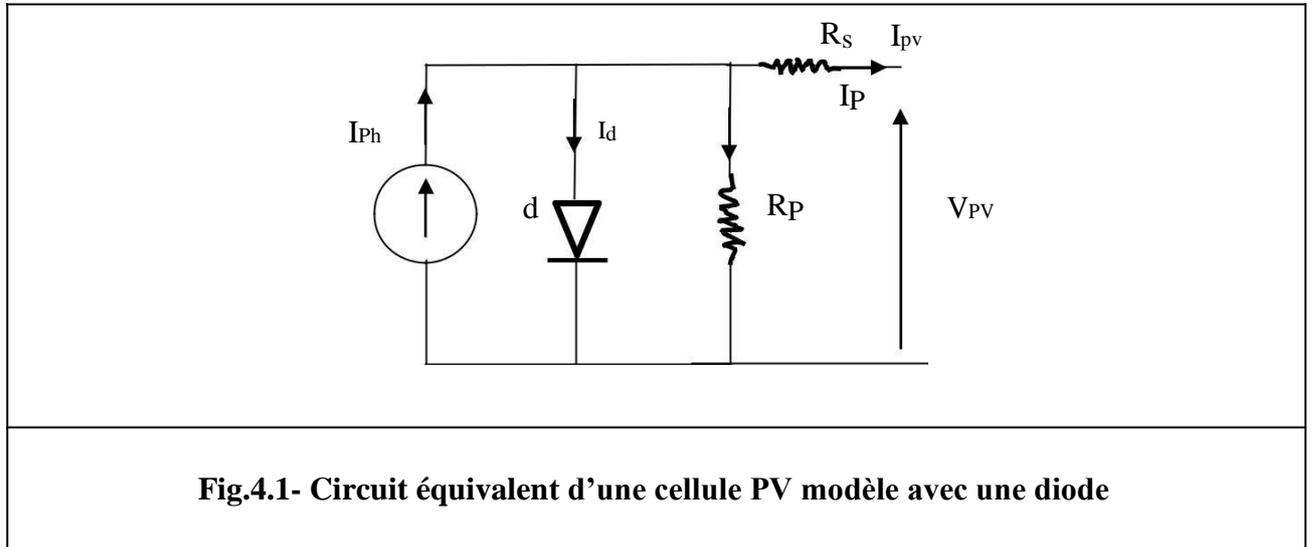
Dans notre travail, nous avons vu les différents paramètres influents sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$, soit pour une cellule ou pour un GPV.

Ces paramètres sont en premier lieu, la température T de la cellule, l'éclairement du soleil E et les autres paramètres tel que, le facteur d'idéalité A , la résistance série R_s , la résistance parallèle R_p .

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous présenterons les résultats expérimentaux en utilisant des données réelles ramenés de la société SKTM (filiale de la Sonelgaz consacrée au développement, exploitation des énergies renouvelables au niveau national), et nous utilisons ces données dans notre schéma bloc de simulation pour faire sortir les courbes caractéristique de deux module PV de technologie monocristalline l'un est fixe et est motorisé. Ensuite, nous interprétons ces résultats des courbes obtenus de la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ pour voir la différence entre les deux cas coté rendement, et comportement dans les conditions données.

4.2- MODELISATION DU GPV.

Pour modéliser notre système PV on utilise le schéma de base d'une cellule ou générateur photovoltaïque avec une seule diode comme il est illustré dans la figure (4.1).



La formule du courant délivré par une cellule PV est décrite comme suit [25] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + I R_s)}{A.K.T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (4-1)$$

Pour un générateur photovoltaïque composé de N_s cellules montées en série et de N_p cellules montées en parallèle les équations caractéristique d'un GPV sont données par [41] [42] :

➤ **Equation photo-courant :**

$$I_{ph} = (I_{ccref} + K_i (T - 298)) \left(\frac{E}{1000} \right) \quad (4-2)$$

➤ **Equation de courant de saturation inverse de la diode :**

Le courant de saturation inverse de la diode est donné par l'équation ci-dessous.

$$I_{rs} = \frac{I_{ccref}}{\left[\exp \left(\frac{qV_{co}}{N_s A.K.T} \right) - 1 \right]} \quad (4-3)$$

➤ **Équation du courant de saturation :**

L'équation reliant le courant de saturation par le courant inverse de la jonction est donnée par :

$$I_0 = I_{sr} \left[\frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[\frac{qEg_0}{A.K} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (4-4)$$

➤ **Équation du courant de sortie du GPV de N_s cellules série et N_p cellules parallèle [39][42]:**

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \exp \left[\frac{q \left(\frac{V_{pv}}{N_s} + \frac{R_s I_{pv}}{N_p} \right)}{A.K.T} - 1 \right] - \frac{N_p V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (4-5)$$

Puisque R_p est très grande pour un générateur comprenant plusieurs cellules PV, l'équation (4-5) devient [41] :

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \exp \left[\frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{N_s A K T} - 1 \right]$$

Où

I_{ccref} : Le courant de court-circuit dans les conditions standard (E=1000 W/m², T=25C°).

K : la constante de Boltzmann (1.38.10-23 Joules/Kelvin).

T : La température de la cellule en Kelvin.

T_{ref} : La température référentielle en Kelvin (298°K)

q: La charge d'un électron =1,6x10⁻¹⁹ C.

A : le facteur d'idéalité de la jonction.

V_{pv}: La tension aux bornes du GPV.

N_s : Le nombre des cellules associées en série.

N_p : Le nombre des cellules associées en parallèle.

R_s : La résistance série du GPV.

R_p : La résistance parallèle du GPV.

Les équations retenues ci-dessus peuvent être modélisées sous Simulink/Matlab, étant donné qu'on s'intéresse à une étude en temps réel, à partir des blocs mathématiques basiques présents dans le catalogue Simulink.

La figure (4.2), représente le schéma bloc de simulation d'un GPV sous Matlab/Simulink par lequel on a effectué nos simulations de tous les cas dans ce chapitre pour étudier l'influence des différents paramètres sur le comportement d'un générateur photovoltaïque et surtout ce qui concerne les deux paramètres météorologiques la température T et l'éclairement E.

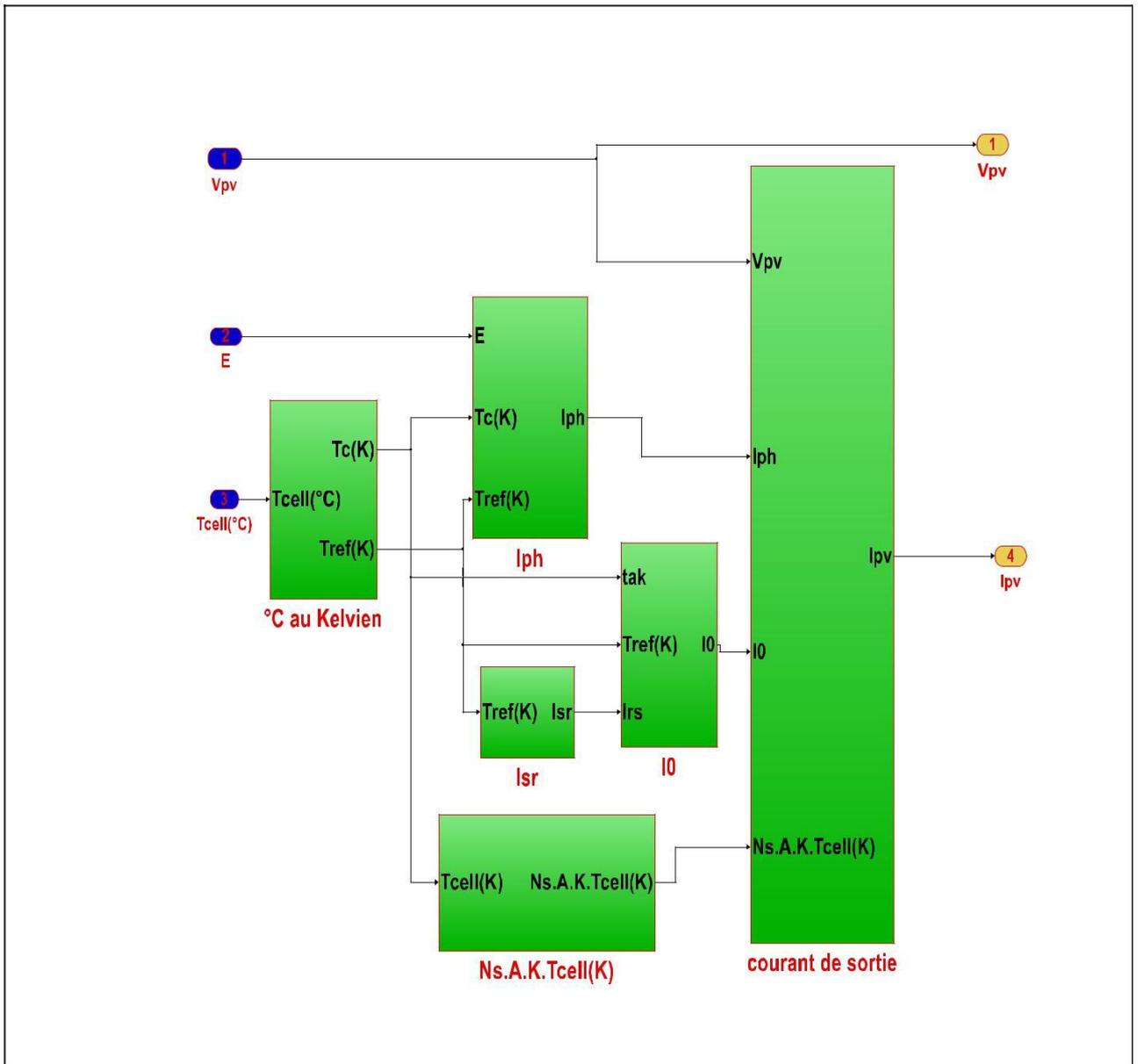


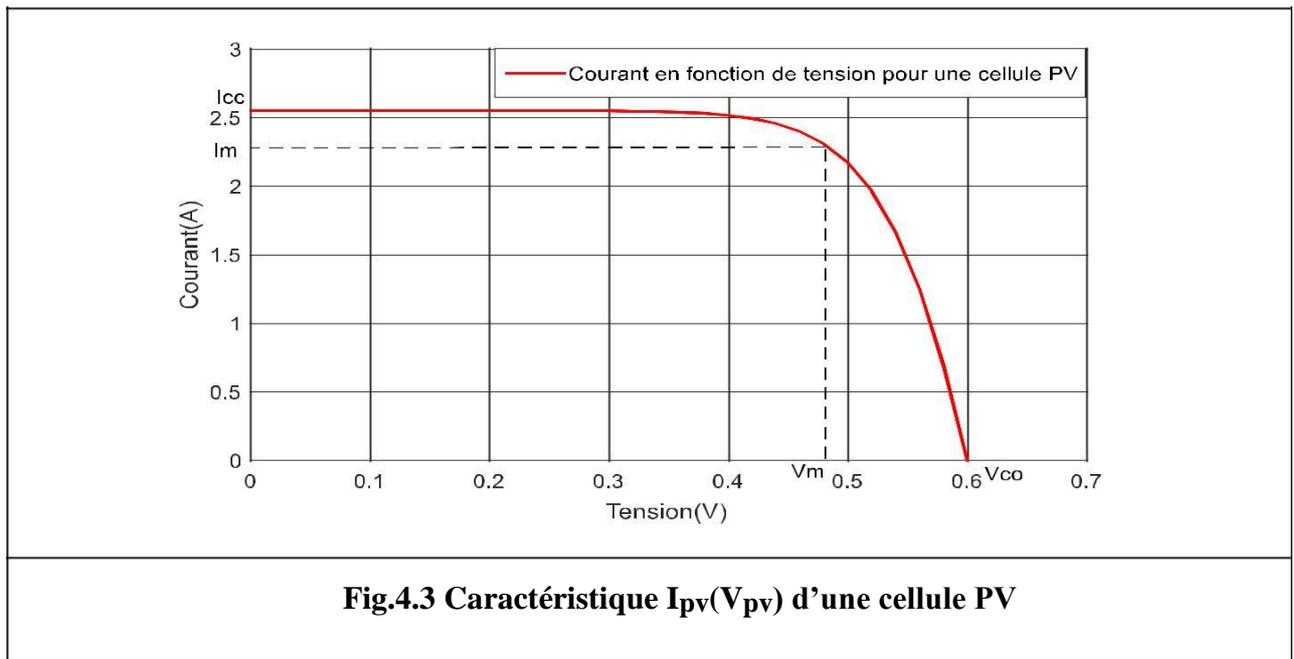
Fig.4.2- Schéma bloc de simulation d'un GPV sous Matlab/Simulink

4.3- CARACTERISTIQUE D'UNE CELLULE SOLAIRE.

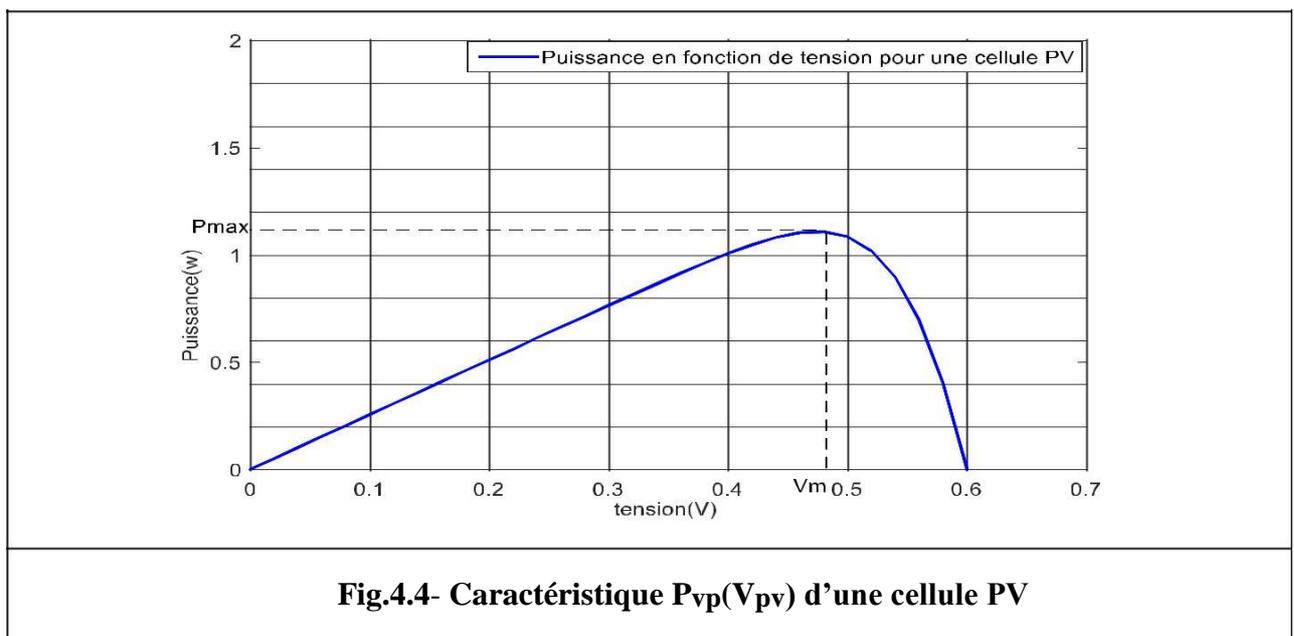
Une cellule PV est caractérisée par deux courbes, le courant en fonction de tension, la puissance en fonction de tension. Pour une cellule en silicium ayant les caractéristiques:

$V_{CO} = 0.6 \text{ V}$, $I_{CC} = 2.55 \text{ A}$, $P_m = 1,153 \text{ W}$ on peut trouver à partir de notre schéma bloc les deux courbes de la cellule PV dans les conditions standard ($T = 25^\circ\text{C}$, $E = 1000 \text{ W/m}^2$) comme suit:

4.3.1- Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$.



4.3.2- Caractéristique $P(V_{pv})$.



Selon les deux courbes ci dessus, nous pouvons trouver les deux cas énoncés précédemment (cellule en court-circuit et cellule en circuit ouvert) pour lesquels la puissance fournie est nulle. Par ailleurs, la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque met en évidence un point de puissance maximum P_{\max} (en anglais MPP signifie Maximal Power Point). Ce point de puissance maximum est le produit d'un courant et d'une tension donnés qu'on appelle respectivement le courant et la tension correspondant au point de puissance maximum, tel que :

$$P_{\max} = V_m \cdot I_m \quad (4-6)$$

Sur les figures (4.3) et (4.4), nous trouvons les quatre paramètres majeurs permettant de caractériser une cellule photovoltaïque :

- Le courant de court-circuit noté I_{cc} .
- La tension à vide notée V_{co} .
- Le courant de puissance maximale I_m .
- La tension de puissance maximale V_m .

La valeur des 4 paramètres dépend essentiellement de deux paramètres extérieurs dont, le niveau d'éclairement de la cellule et la température de la cellule. Il y a d'autres paramètres interne de la cellule photovoltaïque influençant sur les courbes caractérisant la cellule qui sont imposés par le constructeur selon la technologie de la cellule et nous pouvons les simuler tel que la résistance série R_s , la résistance parallèle R_p et le facteur d'idéalité A .

Afin de voir le bon fonctionnement de notre modèle étudié, nous avons effectué des simulations suivant les effets des différents paramètres précédents sur les caractéristiques courant-tension.

4.4- EFFET DES PARAMETRES SUR LES COURBE D'UNE CELLULE PV.

En un point donné de la surface de la terre, l'éclairement et la température varient au cours de la journée et selon la saison, mais aussi en raison de causes très locales. Il est donc important de connaître l'évolution des caractéristiques courant-tension en fonction du niveau d'éclairement et en fonction de la température. A l'aide de la caractéristique courant -tension d'une cellule PV, sous éclairement et température bien déterminée, il est possible d'évaluer les performances et le comportement électrique de la cellule photovoltaïque.

La partie de simulation s'est basé sur les schémas bloc en annexe A et B sous Matlab/Simulink.

4.4.1- Effet de la température.

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairage constant ($E=1000\text{W}/\text{m}^2$) pour différentes températures (25°C , 50°C , 75°C , 100°C). La courbe des caractéristiques va présenter quatre allures différentes selon la température.

Les paramètres de la cellule considérés sont : $R_s=0.01\Omega$, $R_p=4\Omega$, $I_{cc}=2.55\text{A}$, $V_{co}=0.6\text{V}$ et $A=1.6$. Selon notre schéma bloc d'une cellule PV en annexe A, on obtient la caractéristique ci-dessous.

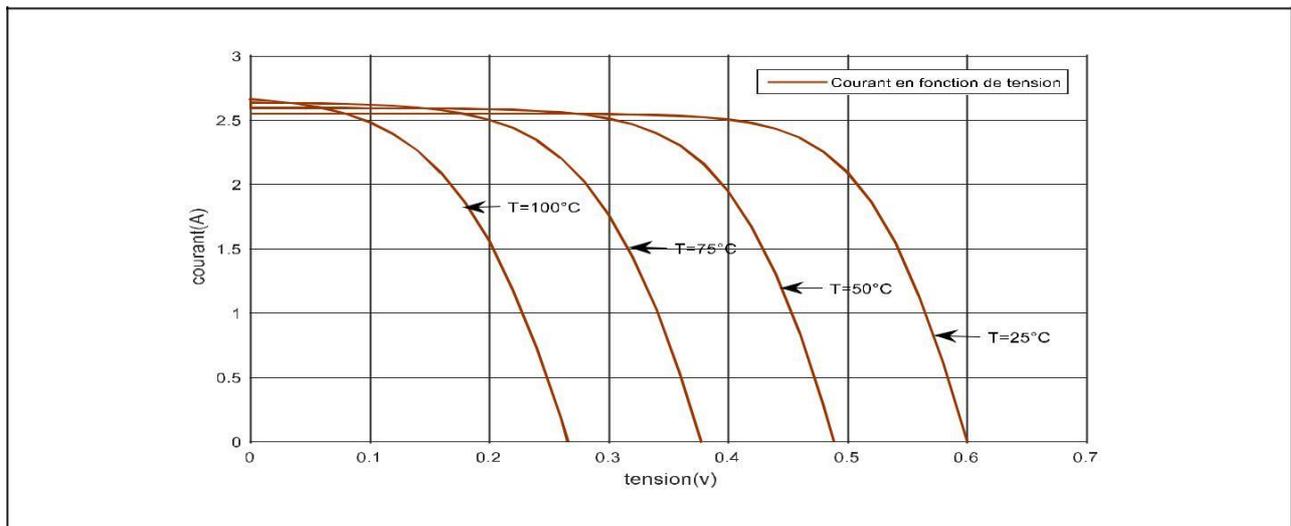


Fig.4.5- Effet de la température sur la courbe $I_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV

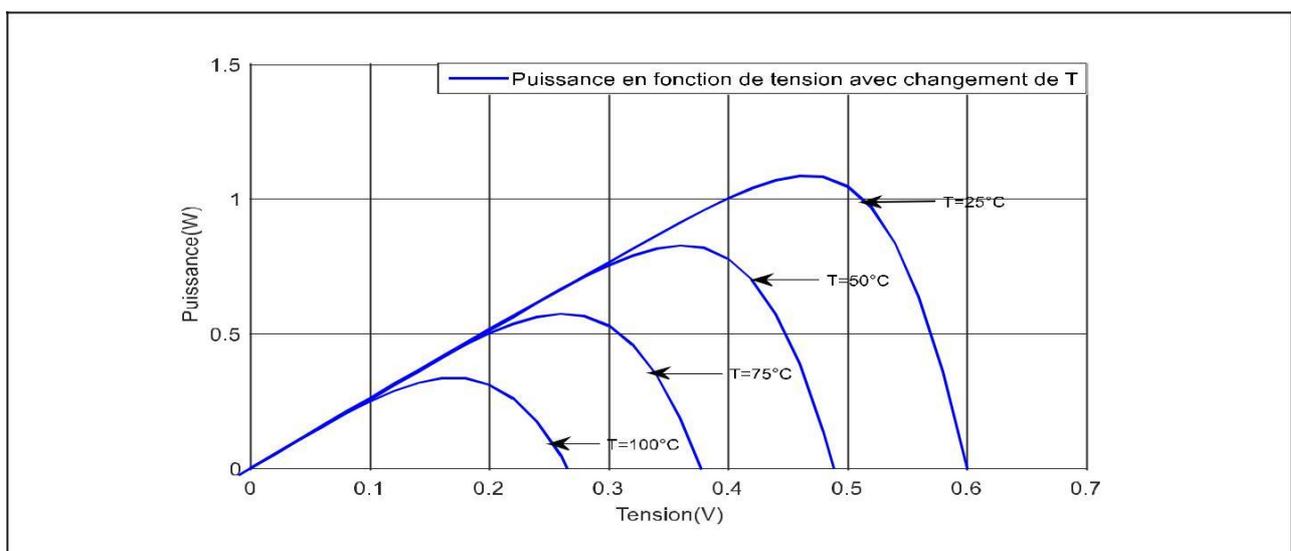


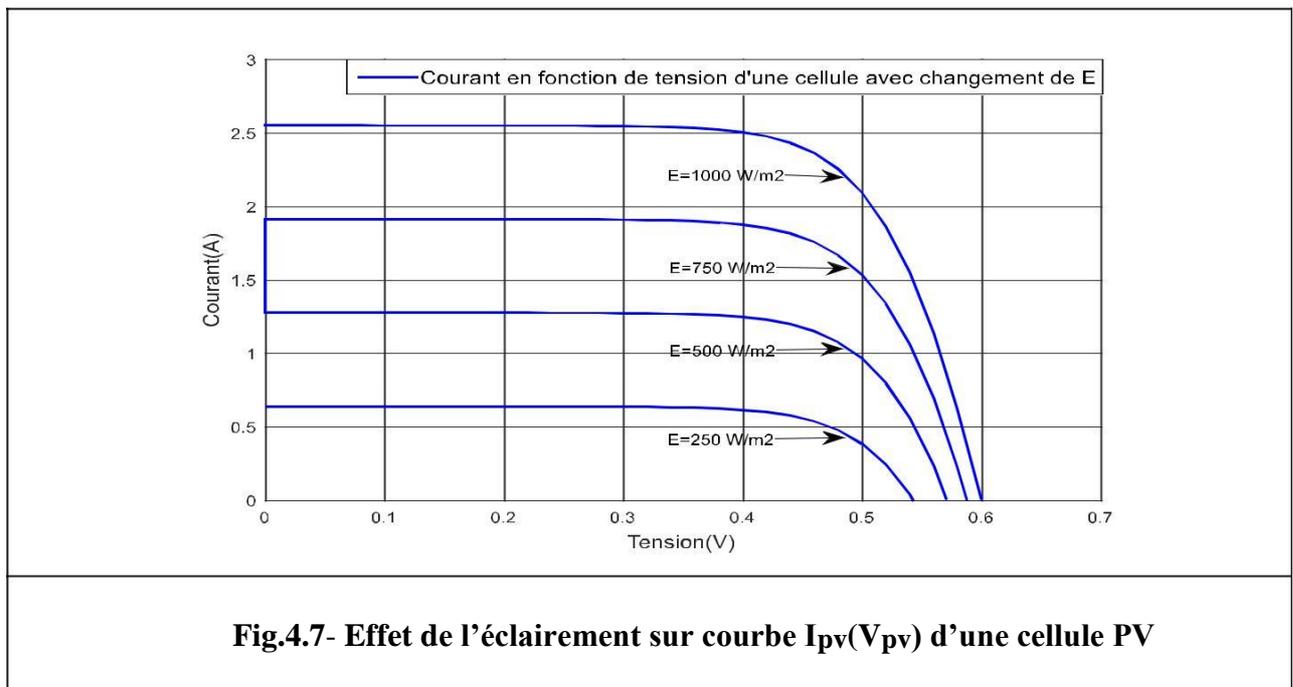
Fig.4.6- Effet de la température sur la courbe $P_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV

Dans la figure (4.5), nous constatons que l'augmentation de la température provoque une augmentation légère du courant du court circuit (I_{CC}). En même temps on enregistre une diminution nette de la tension du circuit ouvert (V_{CO}).

Alors, la température a une influence considérable sur le comportement de la cellule et donc sur son rendement.

L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension (V_m) et un léger accroissement du courant (I_m) et par la suite une baisse relative de la puissance maximale (P_m) voir figure (4.6). Donc on peut déduire que la température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires et a induit un effet notable sur la tension de celle-ci. Par contre, l'effet de la température sur le courant de la cellule photovoltaïque est négligeable.

4.4.2- Effet de l'éclairement.



Sous une température constante de $25^{\circ}C$, nous pouvons remarquer que des fortes variations du niveau d'éclairement provoquent des variations relativement importantes du I_{CC} , alors que les variations relatives de la tension V_{CO} restent faibles car le courant de court-circuit (I_{CC}) est une fonction linéaire de l'éclairement voir équation (2-14) et la tension du circuit ouvert (V_{CO}) est une fonction logarithmique en fonction de l'éclairement voir l'équation (2-15). Aussi sur la figure (4-7), lorsque le niveau d'éclairement est divisé par 2 (il passe de 1000 W/m^2 à 500 W/m^2), on constate que le courant de court-circuit I_{CC} est aussi divisé par 2 (il passe de 2.55 A à 1.275 A) et la tension

du circuit ouvert V_{co} diminue presque de 4 % (0.0024V). Donc l'éclairement influe sur le rendement de la cellule PV.

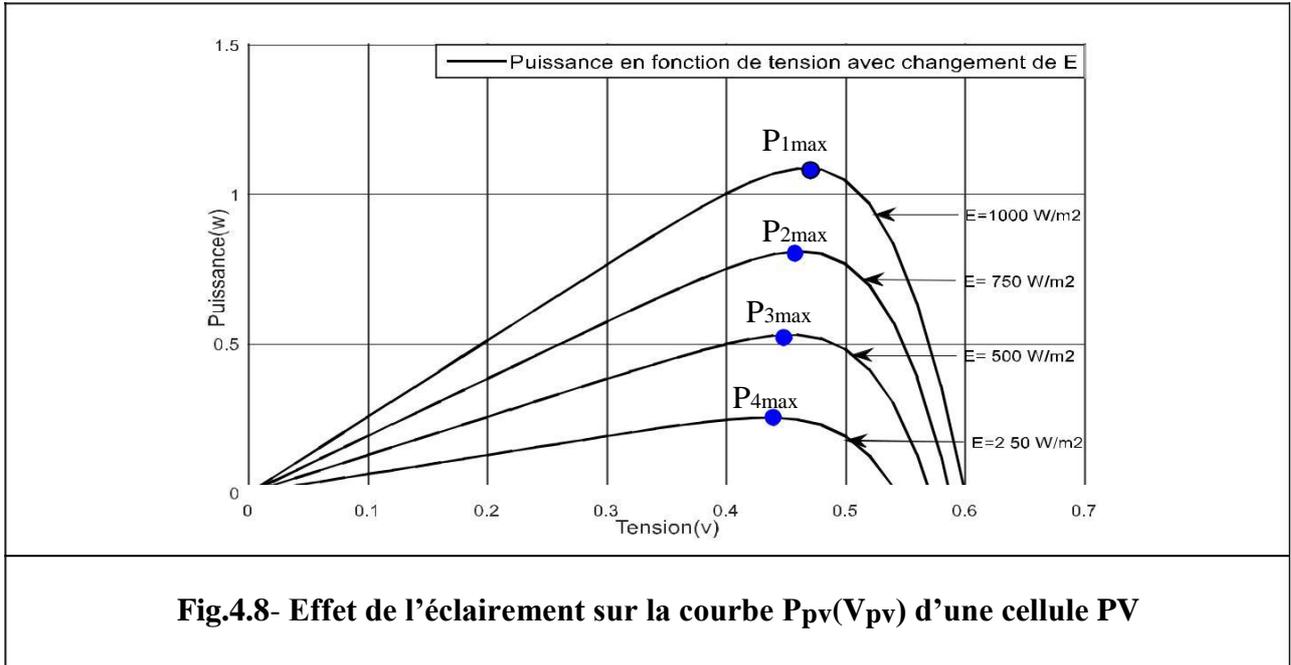


Fig.4.8- Effet de l'éclairement sur la courbe $P_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV

On remarque aussi que l'éclairement a un effet réductif sur la valeur de puissance ainsi que sur le rendement de la cellule. Ceci implique que la puissance optimale de la cellule P_m est proportionnelle avec l'éclairement et le point de puissance maximale se situe presque à la même tension.

4.4.3- Effet de la résistance série R_s .

Sous un éclairement et température sont considérés constants, on varie R_s , on trouve la courbe voir figure (4.9).

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

On remarque que la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le courant du court circuit (I_{cc}) ne sont pas modifiés, mais la caractéristique se déforme très rapidement sous l'effet de changement de R_s . Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ dans la zone où la cellule fonctionne comme une source de tension lorsque R_s augmente.

La valeur de la résistance série est fonction de la résistivité du matériau semi-conducteur, de résistance de contact des électrodes et de la résistance de la grille collectrice [40].

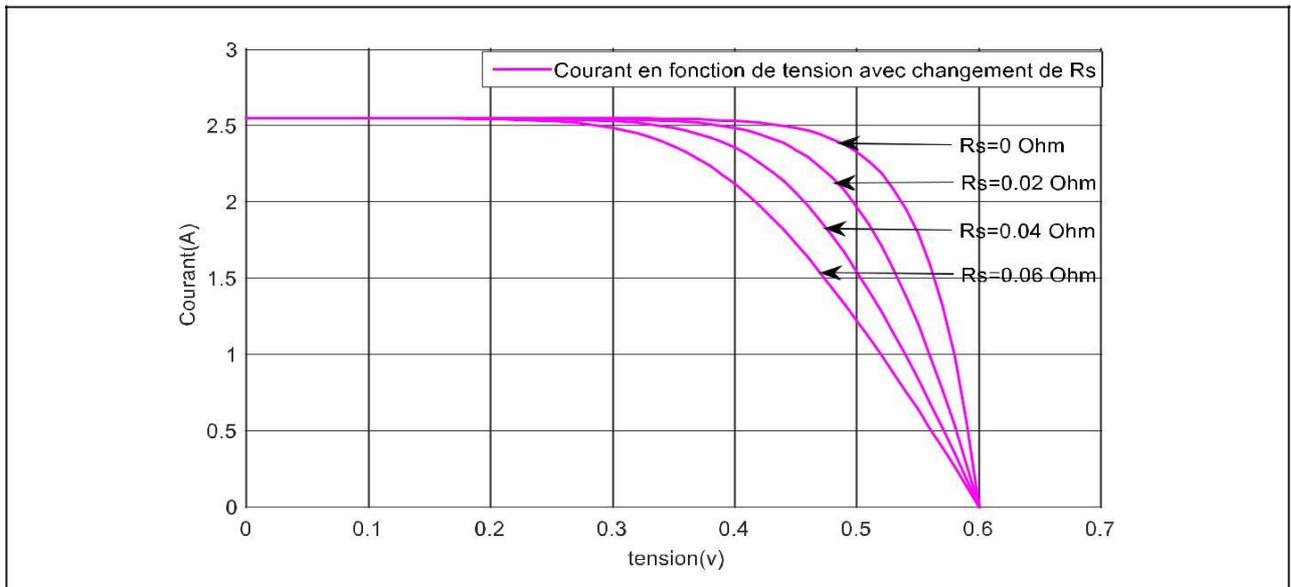


Fig.4.9- Effet de R_s sur la courbe $I_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV

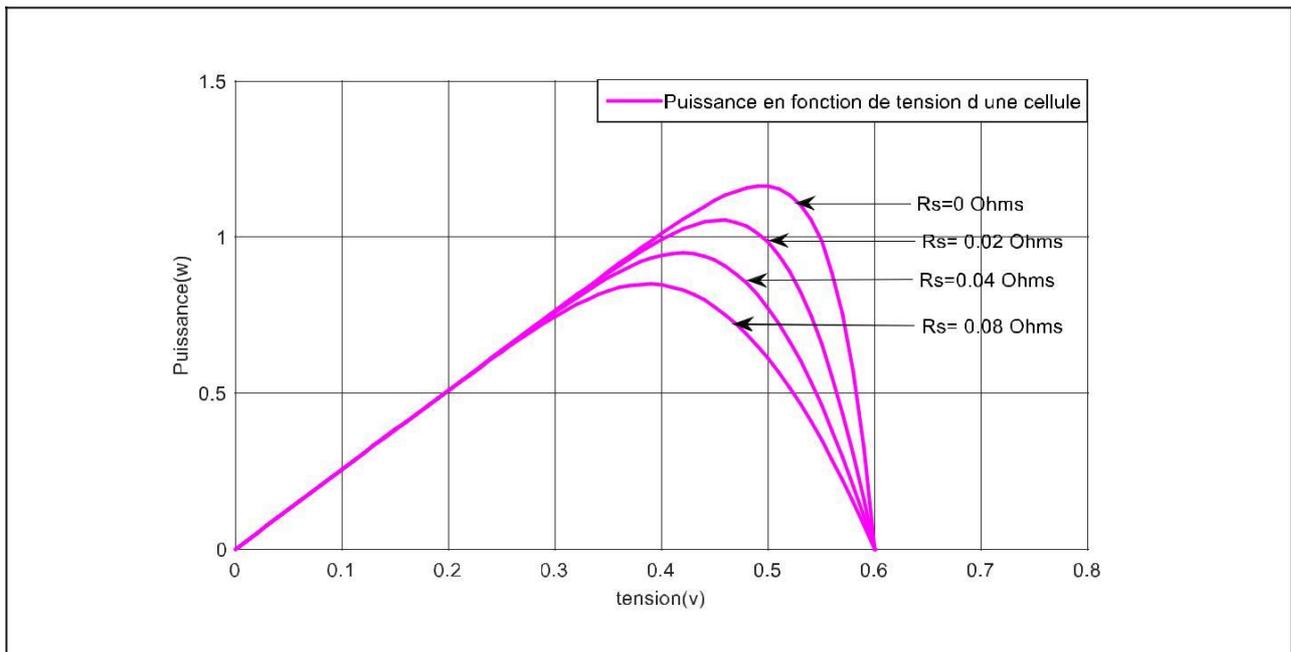


Fig.4.10- Effet de R_s sur la courbe $P_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV

L'augmentation de la résistance série a un effet réductif considérable sur le point de fonctionnement et le facteur de forme (FF) de la cellule ceci implique le changement de la zone de fonctionnement de la cellule.

4.4.4- Effet du facteur d'idéalité A.

Selon la figure (4.11) on remarque que la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le courant du court circuit (I_{cc}) ne sont pas modifiés avec l'augmentation du facteur d'idéalité, mais la caractéristique se déforme lentement sous l'effet de changement du facteur d'idéalité. L'augmentation du facteur idéalité de la diode influe inversement sur le point de puissance maximale et cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement voir figure (4-11) et figure (4-12).

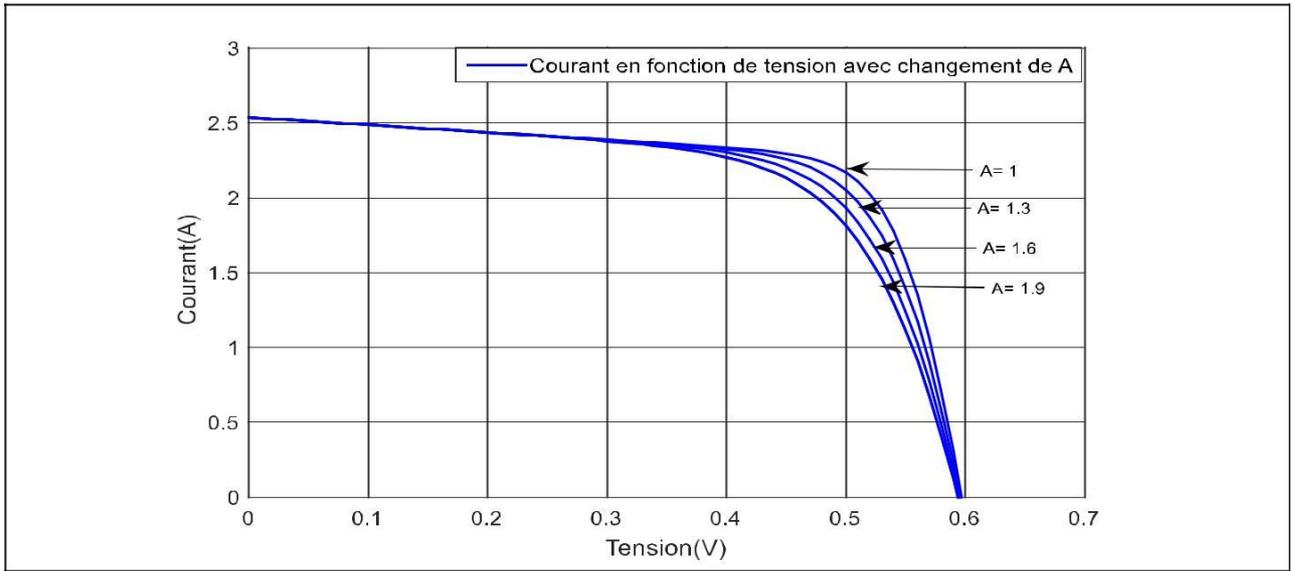


Fig.4.11- Effet du Facteur d'idéalité sur la courbe $I_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV

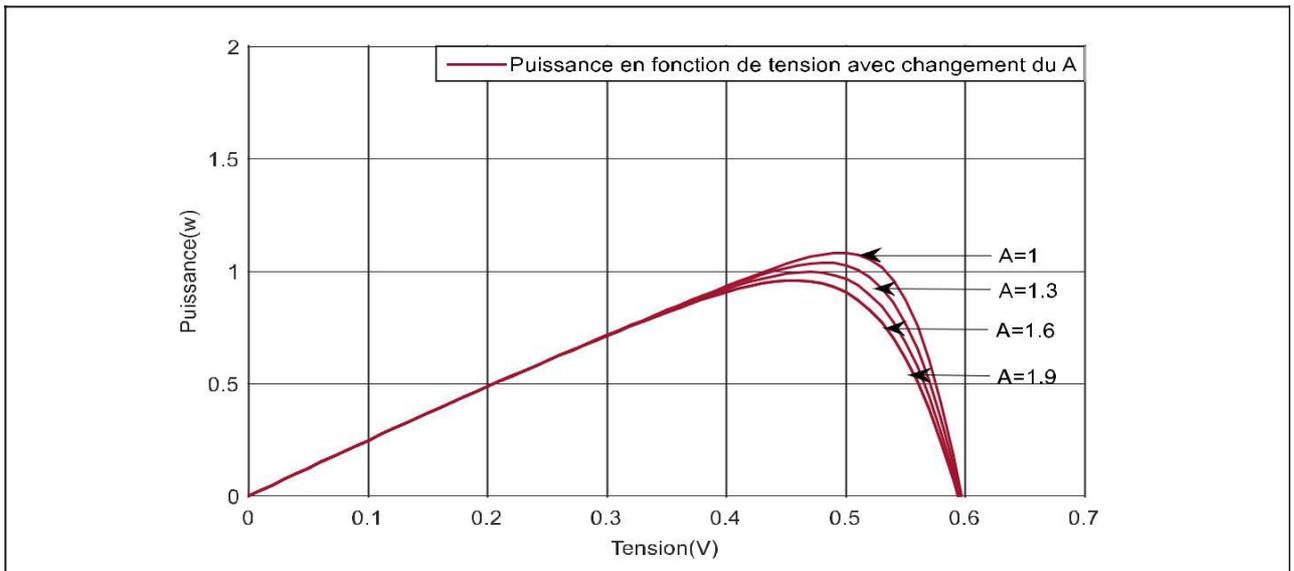


Fig.4.12- Effet du Facteur d'idéalité sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule

4.4.5- Effet de la fuite de la jonction P-N ou la résistance shunt.

La figure (4.13), montre l'influence de la résistance parallèle R_p sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ de la cellule solaire sous éclairement de $1000W/m^2$ et une température de $25^\circ C$.

Pour montrer cet influence on prend les valeurs de R_p : $R_p= 1\Omega$, $R_p= 1.5 \Omega$, $R_p= 2\Omega$ et $R_p= 3 \Omega$.

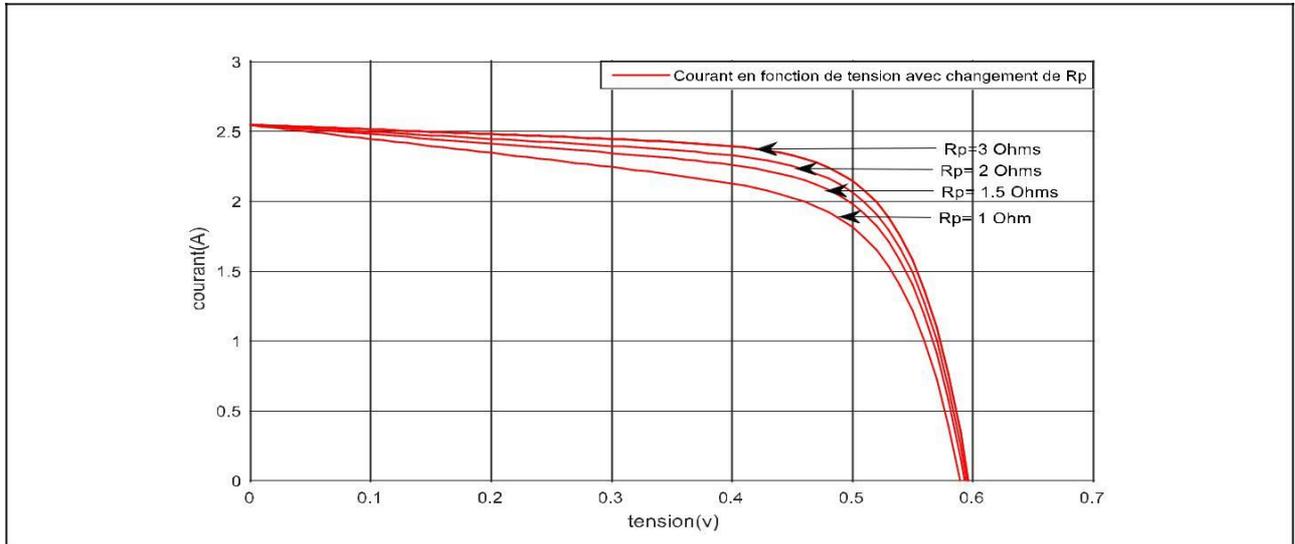


Fig.4.13- Effet de la résistance R_p sur la courbe $I_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV

On remarque que la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le courant du court circuit (I_{cc}) ne se changent pas, mais la courbe caractéristique de la cellule se déforme avec une diminution de la valeur de cette résistance, cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de courant.

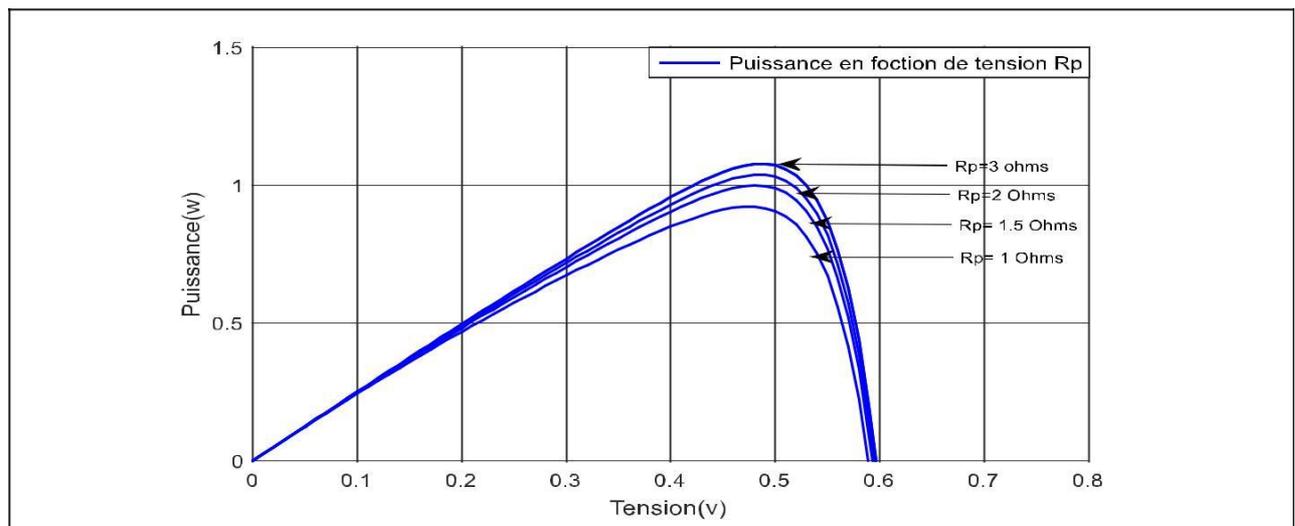


Fig.4.14- Effet de la résistance R_p sur la courbe $P_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV

La figure (4.14) montre que l'augmentation de la résistance shunt provoque une augmentation de point de puissance maximale.

4.5- CARACTERISTIQUES D'UN MODULE SOLAIRE PV.

Pour étudier les caractéristiques d'un panneau solaire composé de N_s cellules en série et N_p cellule en parallèle, nous allons utiliser notre schéma bloc standard réalisé l'aide du logiciel Matlab-Simulink pour simuler tous les cas étudiés précédemment pour une seule cellule PV.

Dans cette partie nous allons baser sur les caractéristiques électriques d'un module données dans le tableau (4.1) [41].

Ces spécification électriques sont mesurés sous les conditions standards : Température $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$; Eclairage $E_{ref} = 1000\text{W}/\text{m}^2$. Pour les paramètres intérieurs nous prenons [41] : Facteur d'idéalité $A = 1.6$, énergie de gap $E_{g0} = 1.1$; Coefficient de température du courant du court-circuit $K_i = 0.0017 \text{ A}/^\circ\text{C}$;

Constant de Boltzman $K = 1.3805 \times 10^{-23} \text{ J}/\text{K}$; La charge d'électron $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Concernant les caractéristiques électriques du module sont données dans le tableau (4.1) ci-dessous

Tab.4.1 : Caractéristiques électrique du module PV [41]	
Puissance maximale P_{max}	37.08 W
Tension à P_{max} V_m	16.56 V
Courant à P_{max}	2.25 A
Tension à circuit ouvert V_{CO}	21.24 V
Courant de court circuit I_{cc}	2.55 A
Nombre de cellule en série N_s	36 ou 18
Nombre de cellule en parallèle	1

Pour réaliser ce module PV, nous utilisons les données électriques du module indiqués dans le tableau (4.1) sur notre modèle en schéma bloc et on discute les résultats de l'effet des différents paramètres sur les deux caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{vp}(V_{pv})$ de notre module PV. On prend deux cas $N_s = 18$ cellules associée en série et $N_s = 36$ cellules montée toujours en série avec $N_p = 1$.

Dans ce qui suit, et pour voir l'influence des différents paramètres sur le comportement d'un module PV, nous allons présenter et discuter les même cas pour une seule cellule PV.

Les générateurs photovoltaïques sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle d'un grand nombre de cellules élémentaires. Ces groupements sont appelés modules, puis panneaux.

L'association série/parallèle des cellules PV permet d'obtenir des valeurs de courant et de tension selon le besoin et selon le domaine d'utilisation voir figure (4.15) et (4.16).

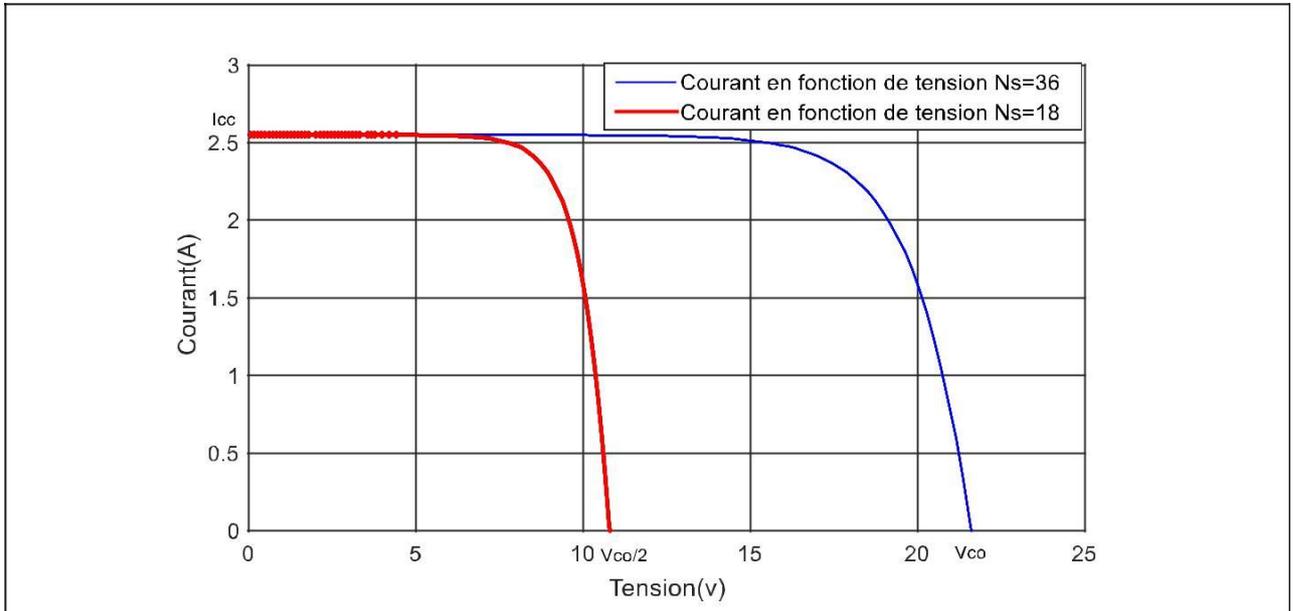


Fig.4.15- Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'un module PV, $N_s=36$ et $N_s=18$

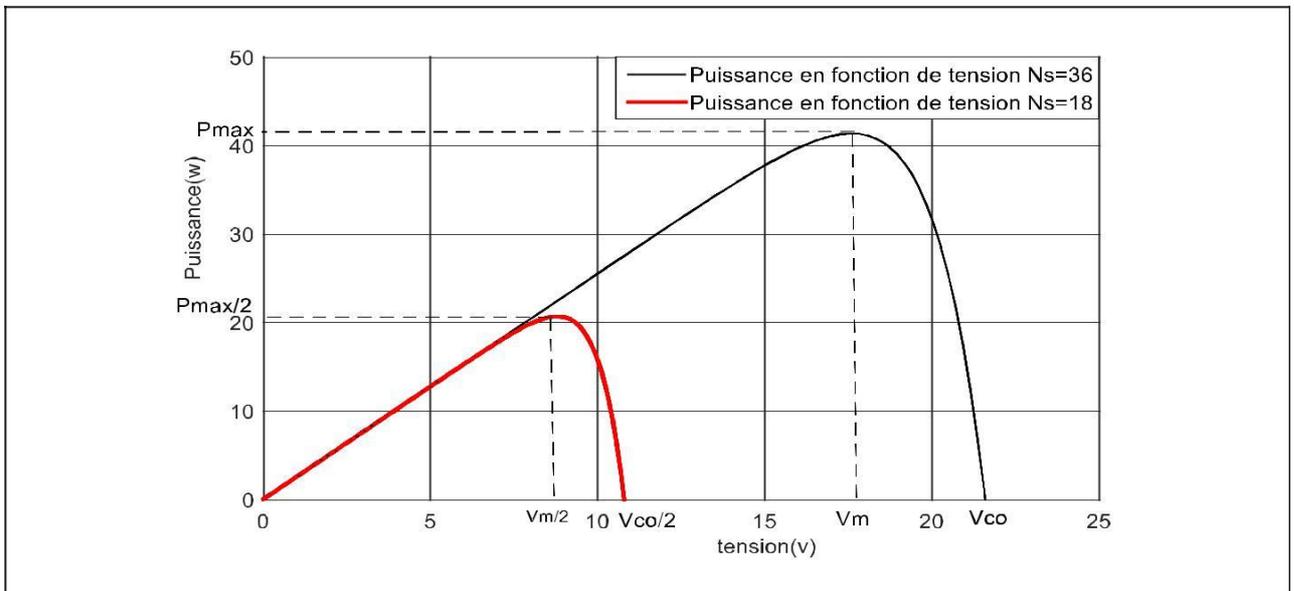


Fig.4.16- Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un module PV, $N_s=36$ et $N_s=18$

Dans la figure (4.15), nous observons que la valeur de la tension en circuit ouvert V_{CO} pour $N_s=36$ cellules associées en série est doublée Par rapport à $N_s=18$ cellules montées de la même façon que les précédentes, alors que le courant de court-circuit reste constant pour les deux cas.

4.5.1- Effet de la température.

Pour les mêmes conditions d'une cellule PV, nous varions la température de notre module PV en prenant $N_s=18$, $N_s=36$ et $N_p=1$ tel que $T=25^\circ\text{C}$, $T=50^\circ\text{C}$, $T=75^\circ\text{C}$ et $T=100^\circ\text{C}$ et nous allons voir le comportement de notre module PV sous un éclairement $E=1000\text{W/m}^2$.

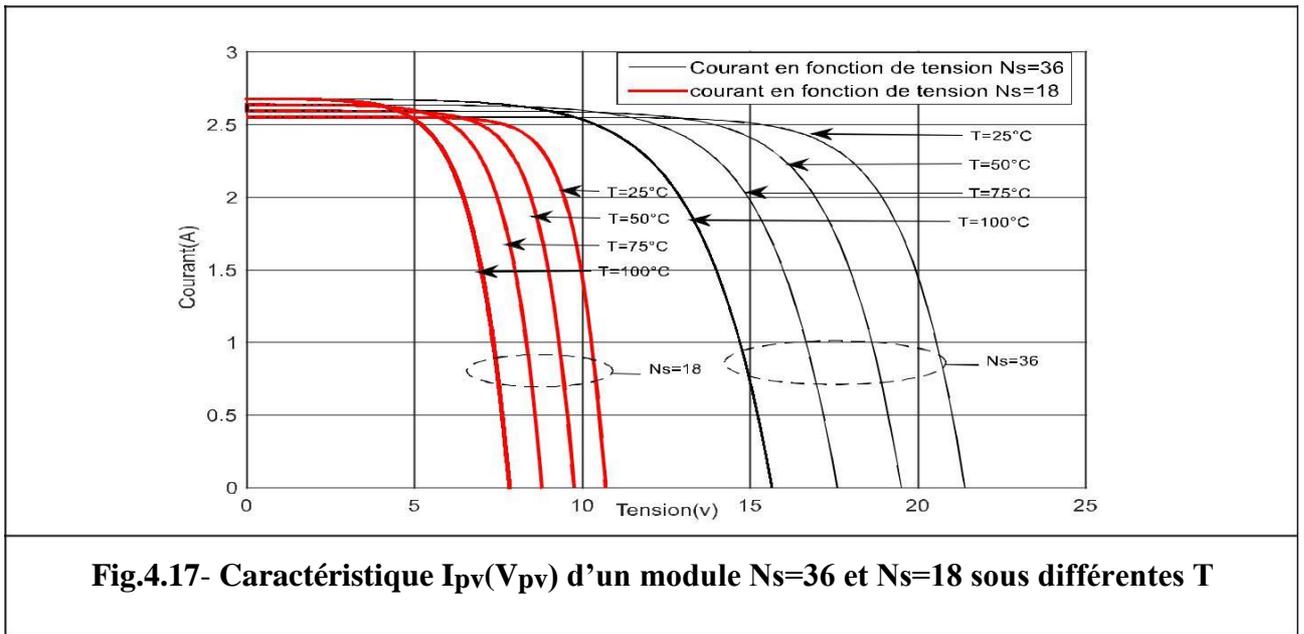


Fig.4.17- Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'un module $N_s=36$ et $N_s=18$ sous différentes T

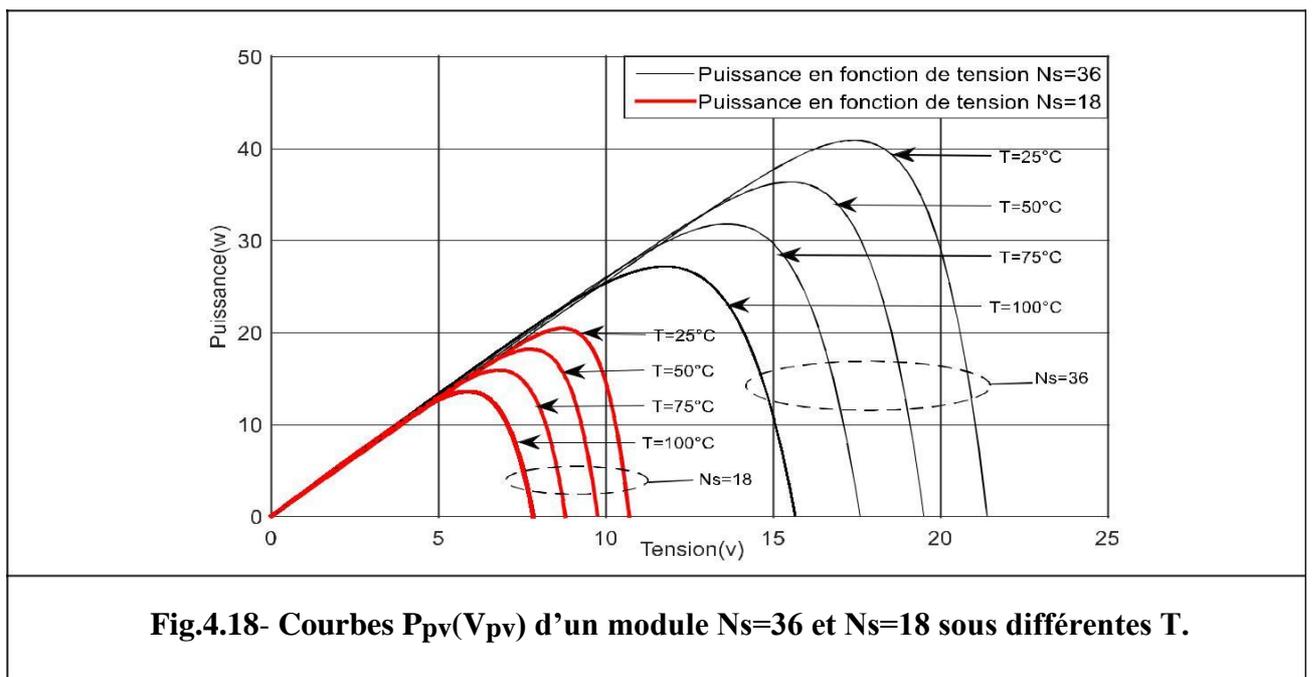


Fig.4.18- Courbes $P_{pv}(V_{pv})$ d'un module $N_s=36$ et $N_s=18$ sous différentes T.

Selon la figure (4.17), on observe que le courant de court-circuit reste constant, alors que la tension du circuit ouvert diminue rapidement suite à l'augmentation de la température pour les deux modules PV. La courbe des caractéristiques va présenter des allures différentes selon la température. La tension à vide va diminuer lorsque la température a augmentée, à l'inverse du courant de court-circuit. La variation de tension à vide est pratiquement compensée par la variation du courant de court-circuit.

Donc nous pouvons dire que la température du module a une forte influence sur la tension à vide du module. Plus la température du module augmente, plus la tension à vide V_{co} diminue. Par contre, la température du module influence très peu sur le courant de court-circuit I_{cc} .

4.5.2- Effet de l'éclairement E.

Sous une température de 25°C, on varie l'éclairement E du module PV avec $N_s=18$ et pour $N_s=36$.

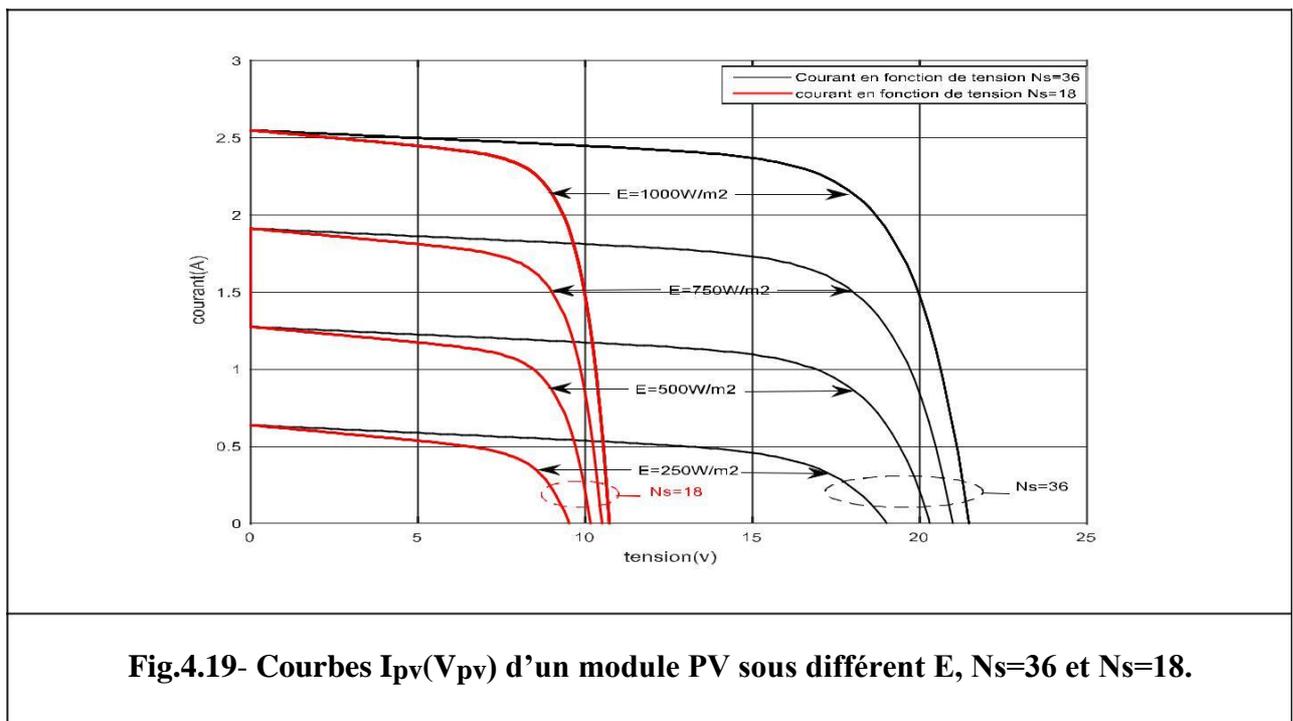


Fig.4.19- Courbes $I_{pv}(V_{pv})$ d'un module PV sous différent E, $N_s=36$ et $N_s=18$.

D'après les figures (4.19) et figure (4.20) nous constatons que la variation en éclairement modifie la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ de du GPV solaire, pas dans sa forme générale mais pour les valeurs I_{cc} , V_{co} , I_m , V_m ainsi que la puissance délivrée par ce module PV.

Aussi nous pouvons remarquer que l'éclairement influence sur la puissance maximale ainsi que le rendement du module. Donc on peut dire que la luminosité influence considérablement sur les performances des cellules ou des modules PV.

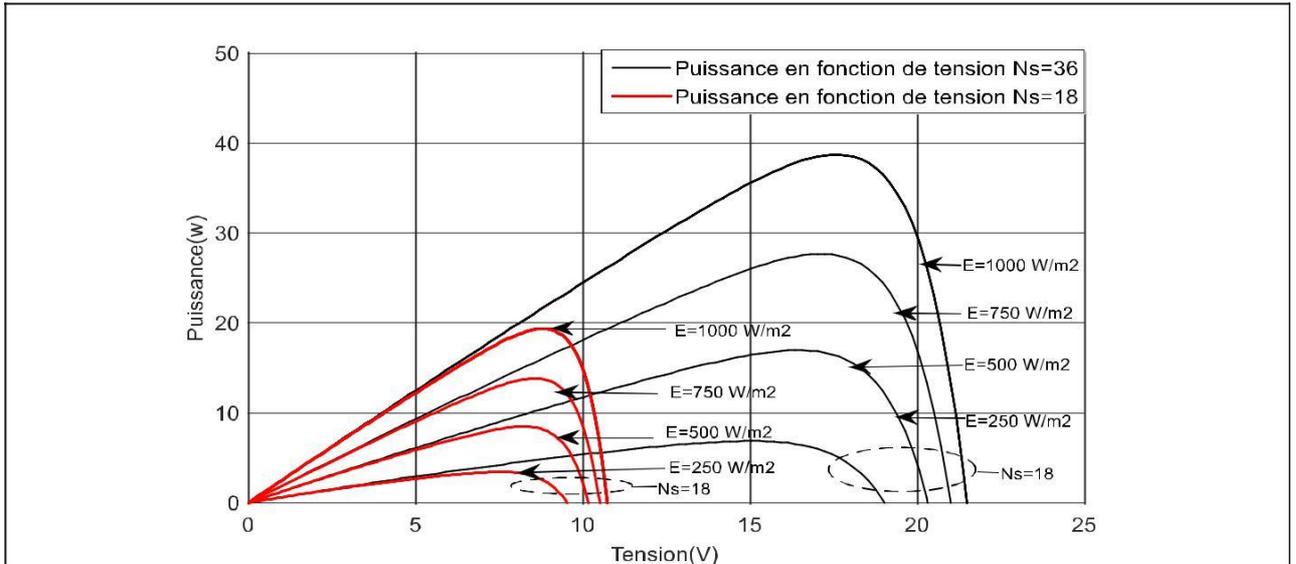


Fig.4.20- Courbes $P_{pv}(V_{pv})$ d'un module PV sous différents E, $N_s=36$ et $N_s=18$

4.5.3- Effet de la résistance série R_s du GPV.

La résistance série dépend de, la résistivité du matériau, des résistances de contact des électrodes et, de la résistance de la grille collectrice [25].

Sous un éclairement et température sont constant dans les conditions standards, $E=1000W/m^2$ et $T=25^\circ C$, nous varions la valeur de la résistance interne R_s . Dans ce cas nous prenons les valeurs de R_s pour $N_s= 18$ et $N_s=36$: $R_s=0 \Omega$, 0.75Ω , 1.5Ω et 2.25Ω .

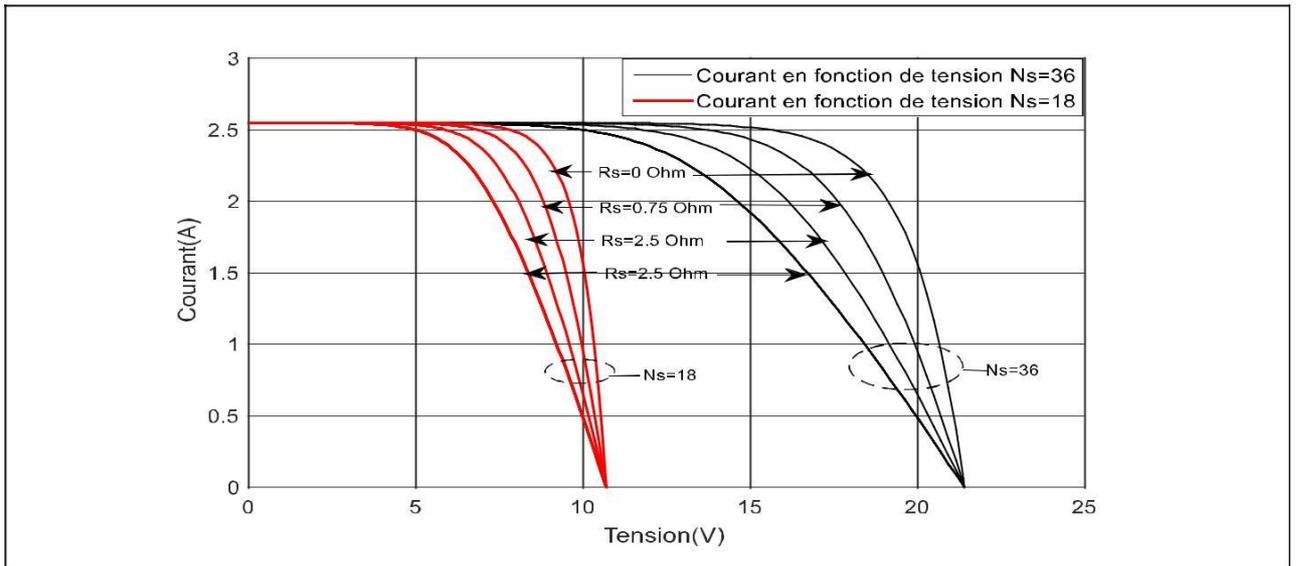


Fig.4.21- Influence de R_s sur la courbes $I_{pv}(V_{pv})$ d'un module avec $N_s=36$ et $N_s=18$

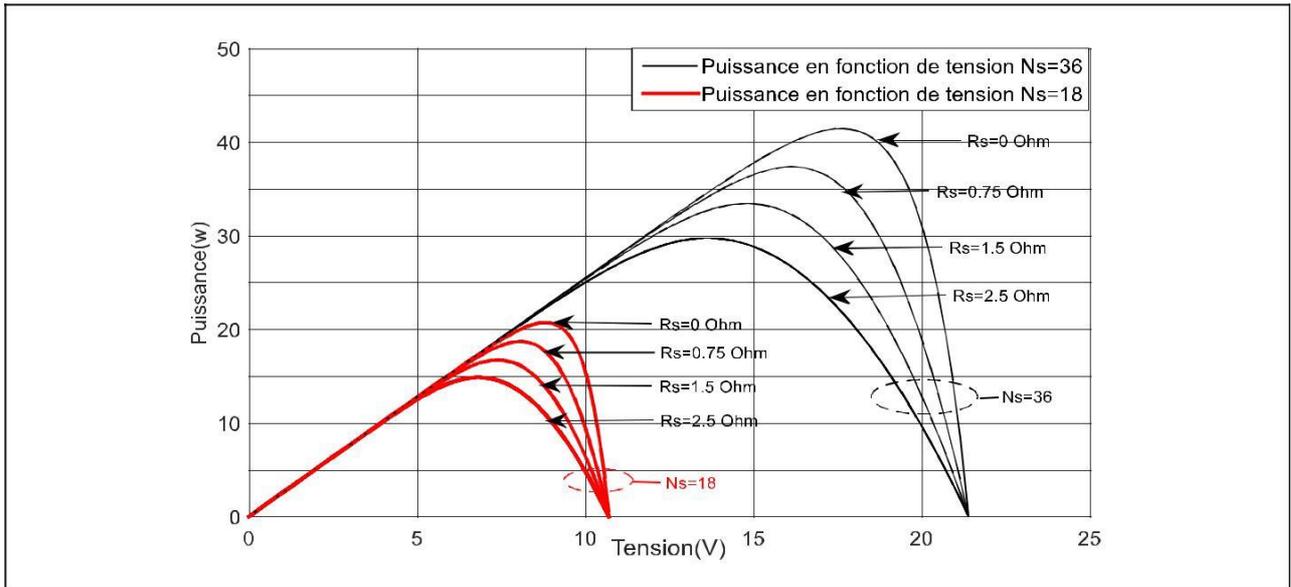


Fig.4.22- Influence de R_s sur la courbes $P_{pv}(V_{pv})$ d'un module avec $N_s=36$ et $N_s=18$

Dans la figure (4.21), nous remarquons que la tension de circuit ouvert (V_{CO}) et le courant du court circuit (I_{CC}) ne sont pas modifiés, mais la caractéristique se déforme très rapidement sous l'effet de R_s . Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et va provoquer une diminution du point maximale de puissance P_{max} comme il est montré sur la figure (4.22) .

4.5.4- Effet du facteur d'idéalité A du GPV.

Dans ce cas nous varions la valeur de ce dernier et nous constatons son effet sur $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$

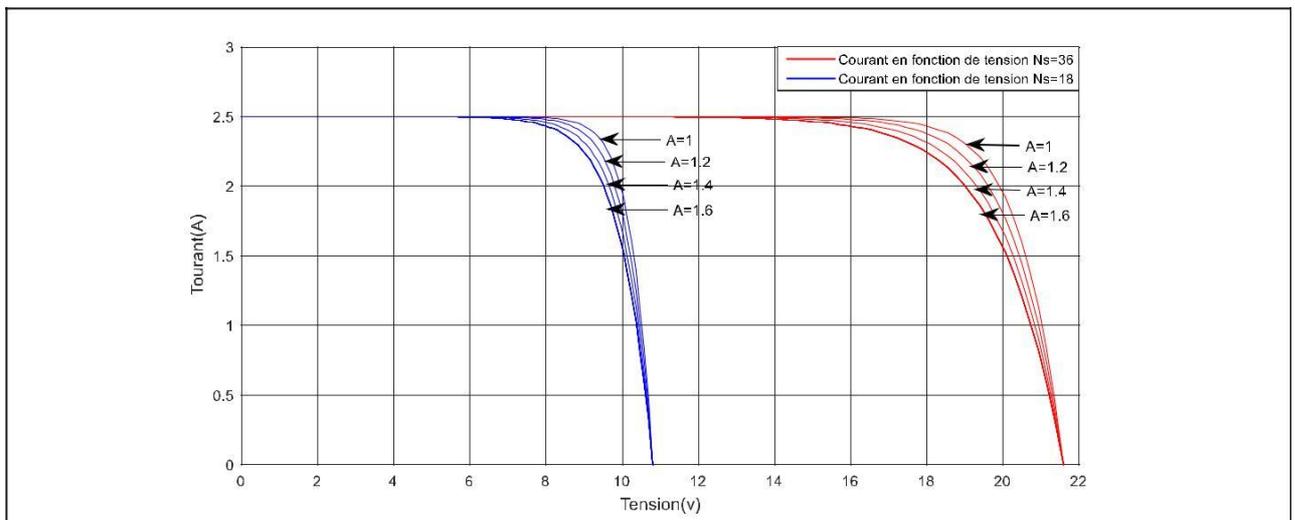


Fig.4.23- Influence du A sur la courbe $I_{pv}(V_{pv})$ avec $N_s=36$ et $N_s=18$

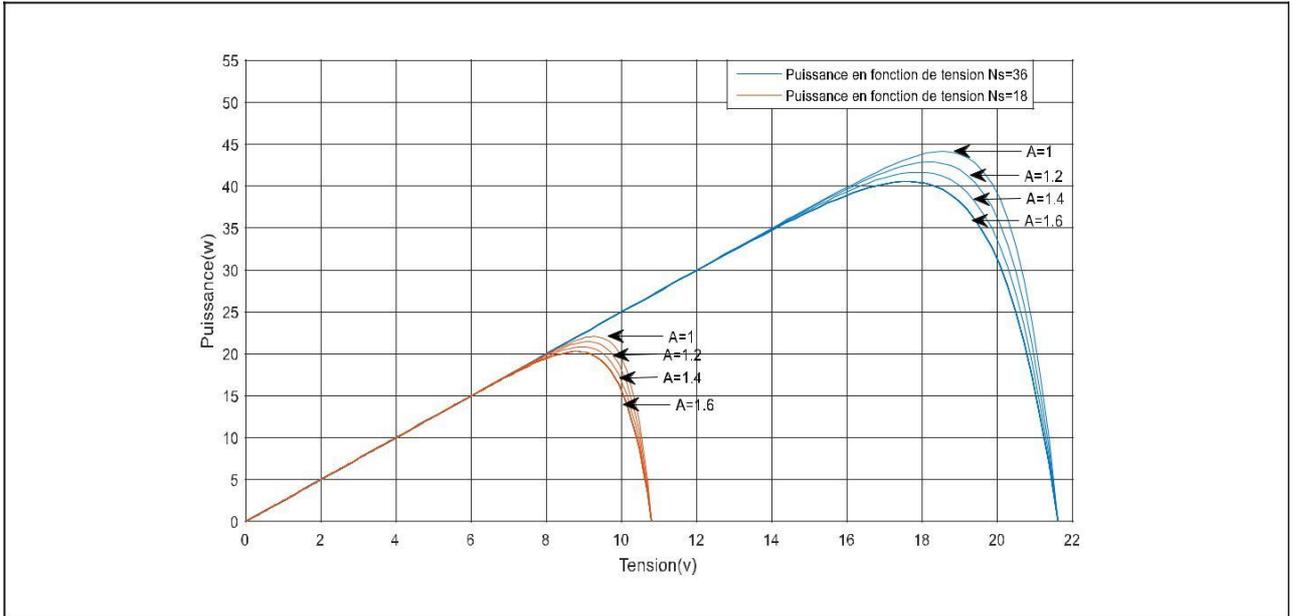


Fig.4.24- Influence du A sur les courbes $P_{pv}(V_{pv})$ d'un module $N_s=36$ et $N_s=18$

4.5.5- Effet de la résistance R_p du module PV.

La résistance shunt est liée directement au processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs du courant (proche du courant de court-circuit) [32].

L'influence de la résistance R_p est pratiquement faible sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$.

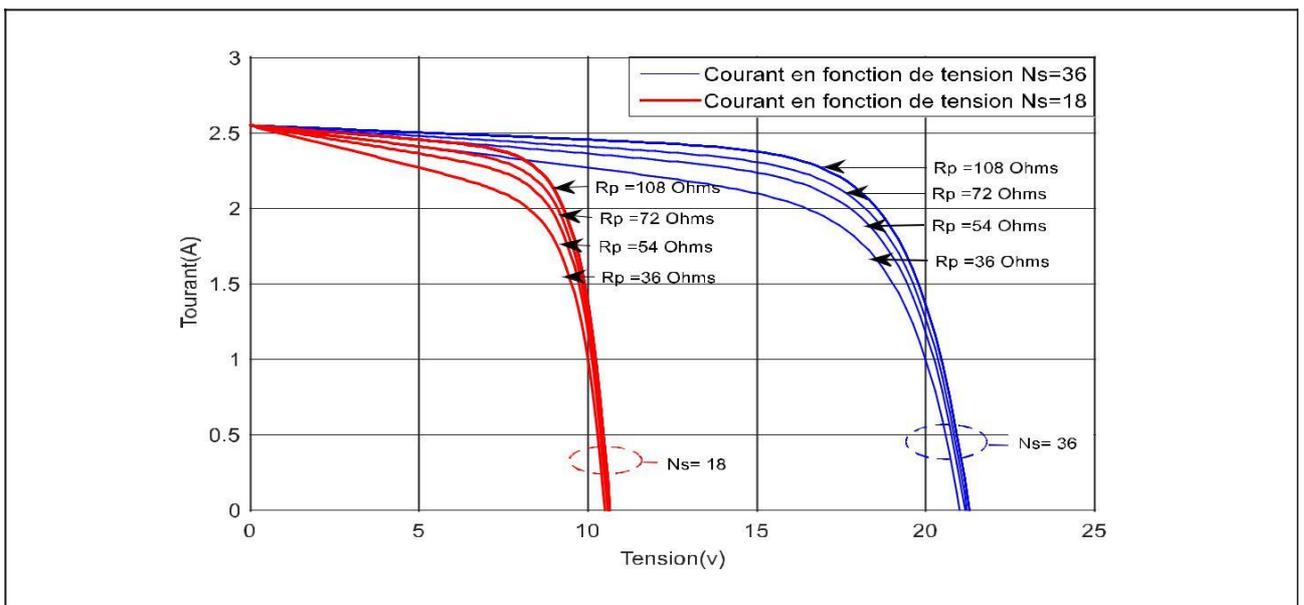
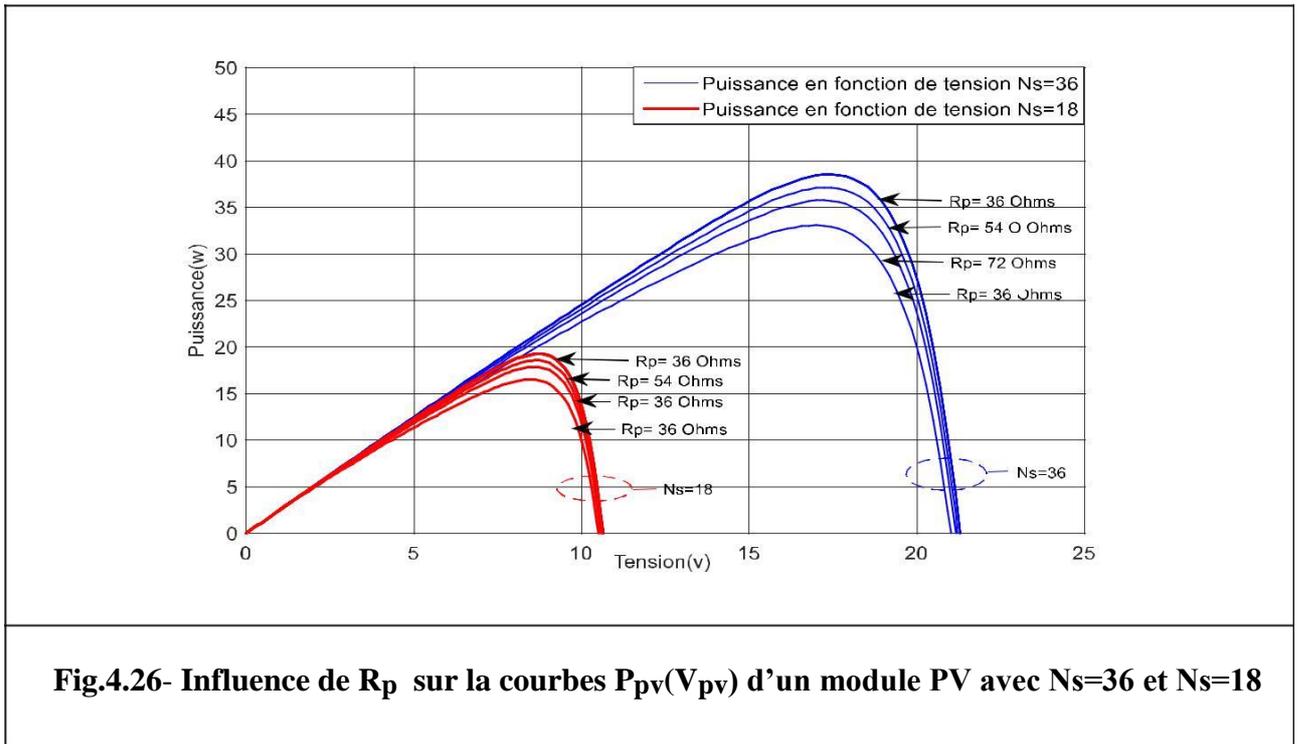


Fig.4.25- Influence de R_p sur la courbe $I_{pv}(V_{pv})$ d'un module PV avec $N_s=36$ et $N_s=18$



La figure (4.25) montre que l'influence de la résistance parallèle se traduit par une augmentation de la pente de la courbe $I_{pv}(V_{pv})$ du panneau dans la zone correspondante à un fonctionnement comme une source de courant. La caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ aussi a le même comportement du courant de sortie du GPV.

4.6- ESSAIS EXPERIMENTAUX.

Dans cette partie, nous présenterons les résultats expérimentaux obtenus durant un travail pratique qu'on a effectué au niveau du site PV de SKTM à Oued Nechou à Ghardaia.

Ce travail consiste à extraire les courbes $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ des module PV fabriqués en technologie monocristalline, l'un est fixe et l'autre est motorisé qui sont installés au niveau du site. Pour cette raison on a utilisé les paramètres internes des modules donnés par le constructeur (R_s , R_p , A , K_i , I_{cc} et V_{co}) et les paramètres météorologiques réels (éclairage et température) enregistrés le jour du 24/04/2016.

Par la suite, nous discuterons l'influence de l'intensité lumineuse sur les paramètres caractéristiques du module PV, P_{max} , V_m , I_m , le facteur de forme FF, et le rendement de conversion photovoltaïque expérimental et simulé.

4.6.1- Données du constructeur [44].

➤ **Une vision sur la centrale de Oued Nechou à Ghardaïa.**

La centrale PV de Oued Nechou représente un champ photovoltaïque comporte 4 sous champs chacun contient une technologie tel que, la monocristalline, la polycristalline, l'amorphe et la couche mince (CdTe).

Les 4 sous champs délivrent une puissance de 1100 kWc répartie comme suit :

452 kWc: Panneaux en silicium monocristallin (un sous champ fixe et l'autre mobile).

452 kWc: Panneaux en silicium polycristallin (un sous champ fixe et l'autre mobile).

100 kWc: Panneaux fixes en silicium amorphe (a-Si).

100 kWc: Panneaux fixes en couches minces (tellurure de cadmium CdTe).

➤ **Schéma synoptique du site PV de Oued Nechou à Ghardaïa.**

La figure en annexe (C) représente le Schéma synoptique du site PV Oued Nechou à Ghardaïa.

Selon ce schéma, nous constatons que pour les deux technologies Mono-cristalline et polycristalline comportent deux techniques d'installation, les panneaux PV fixes, et panneaux PV motorisés. 30% de l'énergie vient des panneaux motorisés pour le monocristallin et le polycristallin.

Beaucoup de conditions sont réunies pour que la ville de Ghardaïa bénéficie d'un climat sec et aride, caractérisé par un ensoleillement exceptionnel: sa situation géographique (30° de latitude Nord, 3°81' de longitude Ouest et 450 m d'altitude), le plus souvent, Ghardaïa a un taux d'insolation très important (en moyenne 75 %) et la moyenne annuelle de l'irradiation journalière globale mesurée sur un plan horizontal dépasse 6000 Wh/m² [43].

4.6.2- Spécifications des modules PV par technologie installés au site PV [44].

Afin de maximiser la production de l'énergie électrique du système PV, les modules sont orientés d'une façon optimale afin de capter un maximum du rayonnement solaire avec une orientation plein sud et inclinaison optimale de 30° par rapport à l'horizontale.

Les caractéristiques interne et électrique des deux modules sont extraites à partir les fiches techniques des panneaux PV données par le constructeur de la centrale PV comme le suivant :

Module monocristallin: Model Atersa, A-250M.

C.S.T: $T= 25^{\circ}\text{C}$, $E=1000 \text{ w/m}^2$ AM1.5. $I_{cc}= 8,79 \text{ A}$; $V_{co}= 36.7 \text{ V}$.

Le tableau (4.2) représente les spécifications techniques internes du module étudié selon la technologie utilisée (Monocristalline). Ces valeurs sont données par le constructeur d'une part.

Tab.4.2- Spécifications du module PV utilisés données par le constructeur [44].								
Technologie	Valeurs							
	$R_s (\Omega)$	$R_p (\Omega)$	N_s	N_p	A	$T_{ref} (^{\circ}\text{K})$	$E_{ref} (\text{W/m}^2)$	$K_i (\text{A}/^{\circ}\text{C})$
Monocristalline	0.16	300	60	1	1.3	298	1000	0.0026

D'une autre part tableau en annexe (D) donne les valeurs enregistrées au niveau du site PV de **Oued Nechou à Ghardaia** le 24/04/2016 en prenant les valeurs de l'éclairement E, la température T, V_m , I_m , P_{max} pour chaque une demi-heure pour des panneaux monocristallin fixe et motorisé et on extrait les courbes obtenues pour voir le comportement des GPV et pour comparer les résultats réels par ceux simulés par notre model de simulation sous Matlab/Simulink.

4.6.3- Présentation des résultats expérimentaux et commentaires.

Après la préparation du module PV en utilisant les spécifications électriques du fabricant on aura un module PV monocristallin de marque ATERSA, A-250M dont les caractéristiques du fabricant. Pour simplifier l'analyse du tableau en annexe (D), on va exprimer les résultats en figure (4-27).

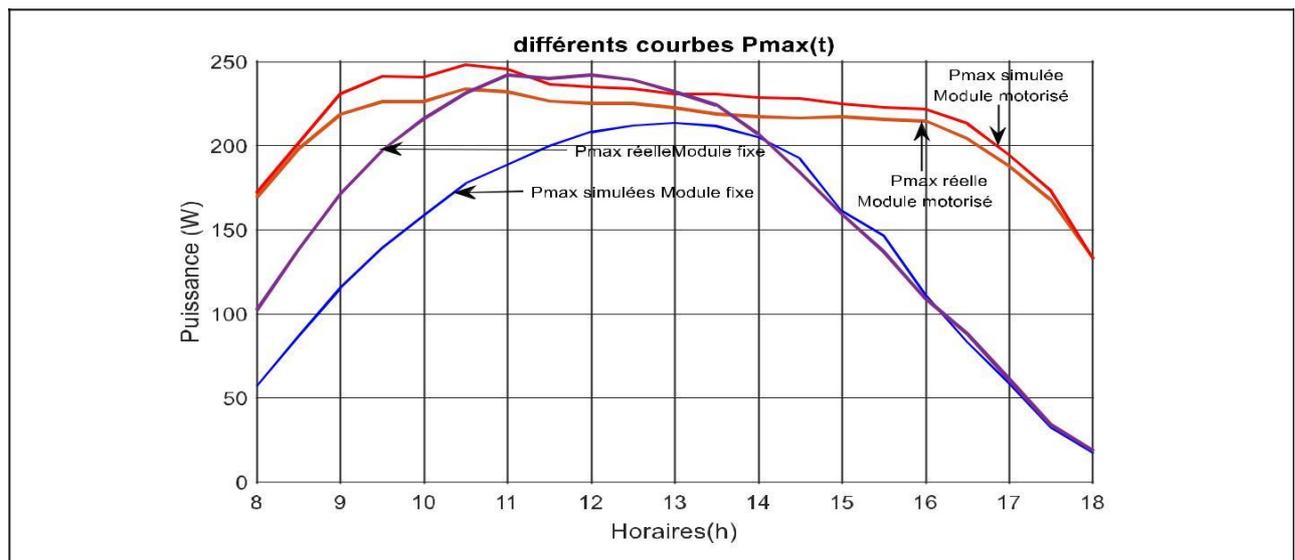


Fig.4.27- Courbes de puissance maximale expérimentale et simulées

On remarque selon la figure (4.27) que :

- L'énergie électrique délivrée par un module fixe est pratiquement faible par rapport que celle d'un module motorisé.

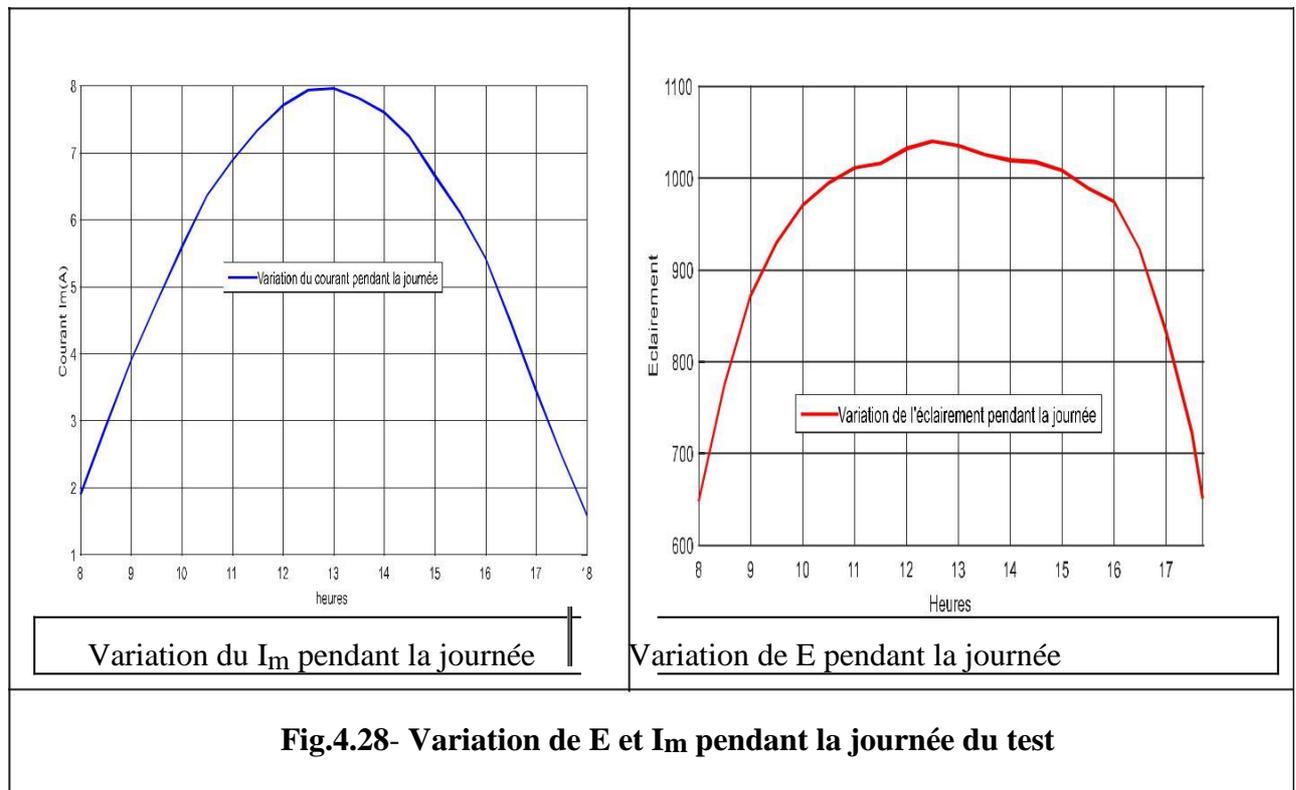
- Dans le cas du module PV fixe notre courbe est loin de courbe réel le matin et le soir, mais les valeurs elles se rapprochent lorsqu' on tend vers midi voir figure (4-27).

Cette divergence, explique la nécessité d'orienter des panneaux vers le soleil le long du jour pour avoir une puissance maximal pour chaque instant de la journée.

- Dans le cas du même module PV mais cette fois ci il est motorisé, on remarque que les résultats réels et les résultats obtenus par simulation sont en accord, ont le même comportement et sont plus proche durant le jour de l'essai.

Donc, on peut conclure que pour améliorer l'énergie du module PV, on doit utiliser le système de motorisation des panneaux PV.

Les deux courbes ci-dessous donnent la variation du I_m et E pendant la journée de l'essai.



Selon la courbe (4.28) on remarque que le courant I_m a le même comportement que l'éclaircement et le courant suit l'éclaircement pendant la journée de test.

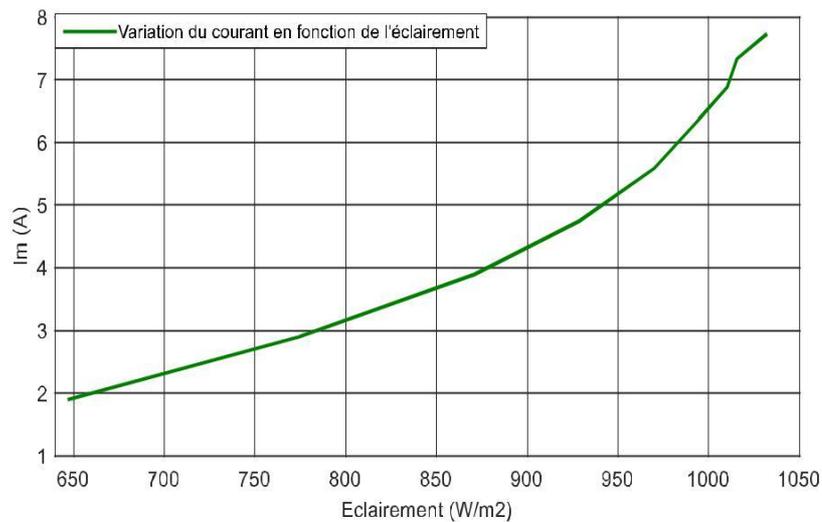


Fig.4.29- Variation du courant I_m en fonction de l'éclairement E

La figure (4.29) montre que l'augmentation de l'ensoleillement provoque une augmentation du courant I_m correspondant à la puissance maximale.

Donc selon les deux courbes (4.28) et (4.29), on peut dire que l'éclairement a une influence directe sur le courant ainsi que la puissance d'un module PV.

Par le biais des mêmes données, on peut tracer la courbe de variation de la tension V_m en fonction de la température comme ci-après :

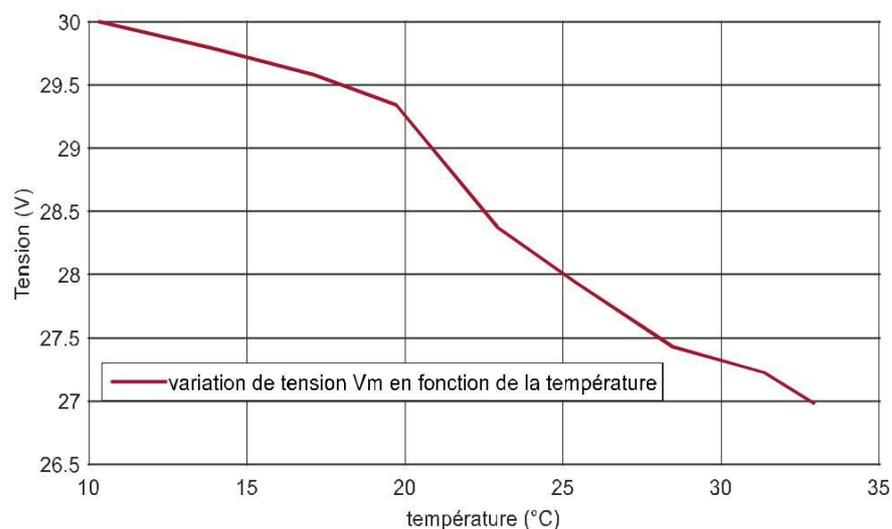


Fig.4.30- Variation de tension V_m en fonction de température T

On constate d'après la figure (4.30) que la tension V_m va diminuer lorsque la température augmente. Donc on peut dire que l'augmentation de la température a un effet réductif sur le rendement du GPV.

4.6.4- Calcul de FF et η .

A partir des données météorologiques indiquées en annexe (D), on peut calculer les deux facteurs utilisés pour qualifier une cellule ou un générateur photovoltaïque qui sont le facteur de forme FF et le rendement de conversion η .

On a vu que dans le chapitre 2 selon les équations (2-18) et (2-19) que:

$$FF = \frac{P_{co,cc}^{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \text{ et } \eta = \frac{P_{inc}^{max}}{P_{inc}} \text{ où } P_{inc} \text{ est l'éclairement incident multiplié par la surface (A).}$$

Puisque le calcul de deux grandeurs qualifiant un GPV sont effectué sous les conditions standards ($E=1000W/m^2$ et $T=25\text{ °C}$), on choisit à partir le tableau voir annexe (D) les valeurs les plus proches de ces conditions, on prend : ($E= 995 W/m^2$ et $T= 25.41\text{°C}$). En utilisant ces données dans notre bloc de simulation on obtient la figure (4.31).

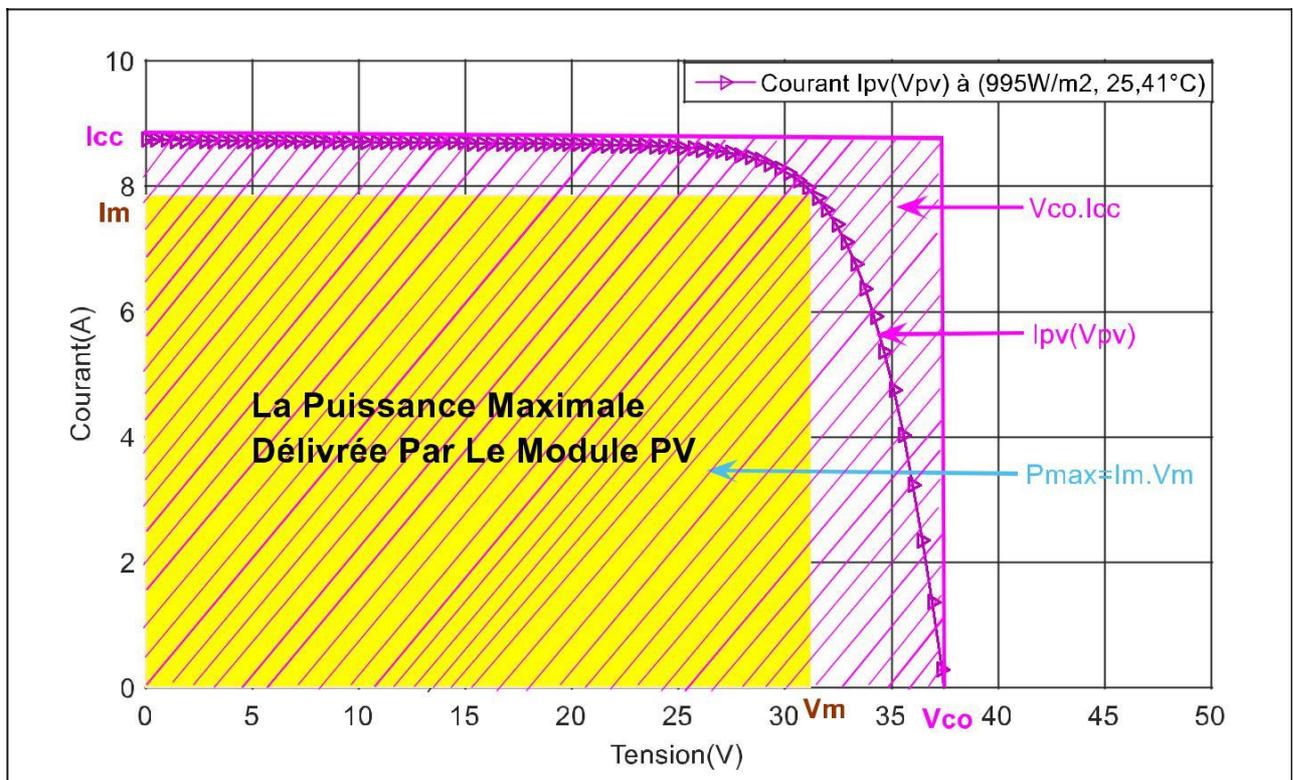


Figure 4.31- Courbe $I_{pv}(V_{pv})$ de simulation module monocristallin ($975 W/m^2, 25.41$).

A partir la figure (4.31), et les formule (2-18) et (2-19), on peut déduire le FF et η simulés et on va les comparer avec ceux du constructeur voir tableau (4.3).

On peut déduire directement le FF à partir la figure (4.31) en divisant la surface en jaune (S) par la surface hachurée (S') comme le suivant :

$$FF = \frac{S}{S'} \quad (4-7)$$

Tab.4.3- Comparaison des paramètres de performances réels et simulés		
Valeurs	Données par le constructeur	Valeurs simulées
Eclairement global E (W/m ²)	1000	994,8
Température du module T (°C).	25	25.54
Rendement de conversion η (%)	15	15.29
Puissance maximale P _{max} (W)	250	248
Facteur de forme FF	0,757	0.750

Le tableau (4.3), représente une comparaison entre les données du constructeur dans les conditions standard et les résultats obtenus par simulation en utilisant des valeurs plus proches des CST à partir le tableau en annexe (D).

On constate que les données du constructeur et les résultats simulés sont en accord.

5- CONCLUSION

Ce chapitre présente les différents modèles de simulation d'une cellule photovoltaïque, un module solaire et un champ photovoltaïque.

Notre étude a été concentrée sur un modèle d'une diode pour simuler le fonctionnement d'une cellule voltaïque, un panneau, un module et un champ photovoltaïque soumis aux différentes conditions d'ensoleillement et de température.

Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données par les constructeurs.

Les performances d'un module PV ou cellule PV sont fortement influencées par les conditions climatiques, essentiellement l'éclairement solaire et la température.

D'après les résultats que nous avons obtenus, nous observons que l'augmentation de résistance série et le facteur de qualité se traduit par la déformation des courbes $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ tandis que

Les deux valeurs V_{CO} et I_{CC} caractérisant la cellule ou le module restent constants.

Aussi d'après les résultats précédents et en comparant avec les résultats d'une cellule, on peut dire que :

- La valeur du courant (tension) est liée au nombre des cellules ou modules (montés en série ou en parallèle) selon le besoin et le domaine d'utilisation.
- La variation de (T , E , R_s , R_p et A) pour un panneau PV entraîne un comportement similaire à celle d'une cellule PV.
- On peut remarquer que l'augmentation de nombre de cellules (en parallèle ou en série entraîne une amélioration considérable des performances du panneau.

Avant de terminer ce chapitre et pour démontrer la fiabilité de notre travail de simulation, on a fait une partie expérimentale ou on a fait des mesures au niveau du site photovoltaïque qui se trouve à Oued Nechou à Ghardaia tel qu'on a ramené les mesures des différents valeurs d'un module PV (I_m , V_m , P_{max} , E et T) ayant la technologie monocristalline fixe, et un autre motorisé pour la journée du 24/04/2016. Après comparaison des résultats, on a trouvé une concordance des résultats expérimentaux et ceux de notre simulation.

CONCLUSION GENERALE.

Les dernières années ont connu une grande importance à la protection de l'environnement. Alors de nombreuses voies de recherches se sont donc orientées vers l'utilisation des énergies renouvelables.

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le soleil (rayonnement), mais aussi la lune (marée) et la terre (énergie géothermique).

Aujourd'hui, on assimile souvent par abus de langage les énergies renouvelables aux énergies propres. Elle représente donc une meilleure alternative efficace aux énergies fossiles pour plusieurs raisons; elle est inépuisable, elle peut être produite localement, selon les besoins locaux, elle préserve l'environnement et n'entraîne aucune nuisance significative.

Parmi ces énergies propres on trouve l'énergie solaire. Cette énergie peut être utilisée directement par l'homme pour, se chauffer et cuisiner (chauffe-eau solaire, four solaire) ou pour produire de l'électricité par l'intermédiaire d'un dispositif appelé en générale un générateur photovoltaïque (cellule, module, panneau ou un champ photovoltaïque). Ce dispositif transforme l'énergie électromagnétique du rayonnement solaire en énergie électrique ; c'est l'effet photovoltaïque.

Les performances électriques d'une cellule solaire sont très sensibles essentiellement à deux paramètres météorologies, l'ensoleillement E et la température T .

L'objectif de notre travail est l'étude des effets des paramètres météorologiques (éclairage et température), l'influence des paramètres internes (R_s , R_p , $A...$) sur le comportement du générateur photovoltaïque.

Nous avons rappelé, en premier lieu des généralités sur les sources de l'énergies renouvelables, en particulier sur le gisement solaire; son pouvoir énergétique et les propriétés des rayonnements reçus par le soleil puis ensuite, nous avons décrit le principe de conversion de ces rayonnement en énergie électrique grâce au dispositif appelé cellule photovoltaïque, son circuit électrique équivalent et la modélisation des différent cas de son fonctionnement comme générateur d'une énergie électrique, puis nous avons fait sa simulation en utilisant les modèles mathématiques démontrés auparavant pour voir et discuter son comportement à l'aide des courbes caractéristiques de sortie $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$, en connaissant les principales grandeurs externes et interne de cette cellule (l'éclaircement, la température, les résistances parasites série et parallèle, le courant de saturation et le facteur

d'idéalité). Au cours de notre étude, nous avons remarqué que le comportement d'un module PV est similaire à celle d'une cellule PV.

Après avoir traité les effets ayant un impact sur les caractéristiques d'un GPV, et afin de mettre en évidence la fiabilité de notre simulation, nous avons fait un travail expérimental là où nous avons ramené les mesures des P_{max} , V_m , I_m , l'éclairement E et la températures T effectuées au niveau du site PV de Oued Nechou à Ghardaïa pendant le jour du 24/04/2016 de 08h00 à 18h00 dans deux cas ; un module PV monocristallin fixe et motorisé (il suite le soleil).

Après avoir préparé notre module à l'aide de notre simulation en utilisant les caractéristique électrique du fabricant du module installé au site PV, nous avons commencé par la présentation graphique inspirée du tableau des mesures et nous avons comparé les résultats simulés par les résultats expérimentaux tel que, nous avons trouvé une divergence entre les valeurs obtenues par la simulation et celles ramenées par les mesures réelles le matin et le soir de la même journée mais vont se converger qu'on tend vers les heures proche du midi.

Cette divergence est raisonnable, et explique la nécessité d'utilisation du système de motorisation des panneaux photovoltaïques pour augmenter le rendement des générateurs PV.

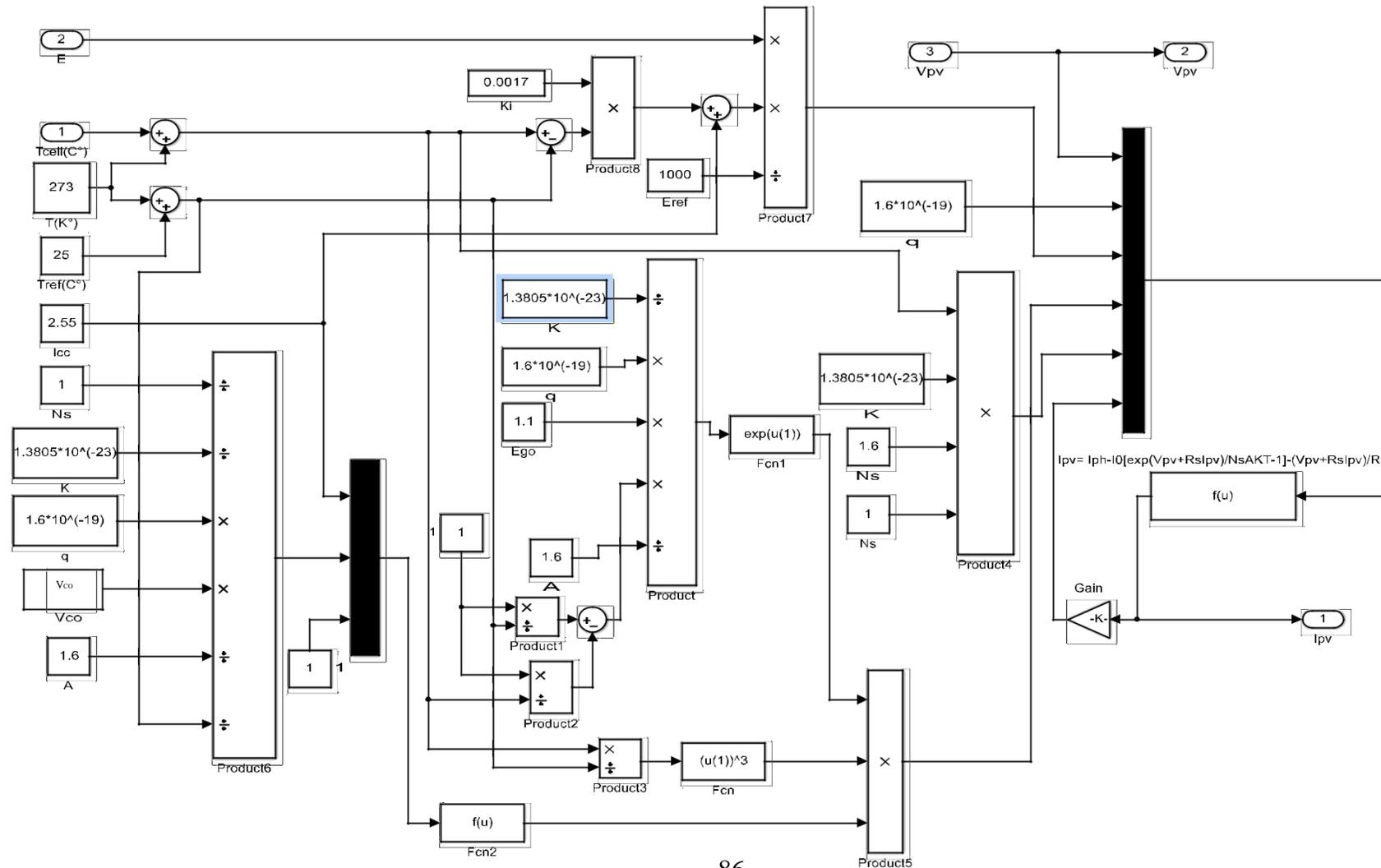
Pour le deuxième cas, nous avons utilisé cette fois ci, les mesures du module motorisé, les courbes obtenues par simulation et elles obtenues par les mesures réelles ont le même comportement et sont en accord.

A la fin de partie expérimentale, nous avons calculé le facteur de forme FF et le rendement de conversion η expérimentalement et par simulation et nous avons les comparé par ceci indiqué sur le tableau des spécifications du module PV fournie par le fabricant où nous avons trouvé presque les même valeurs de ces grandeurs.

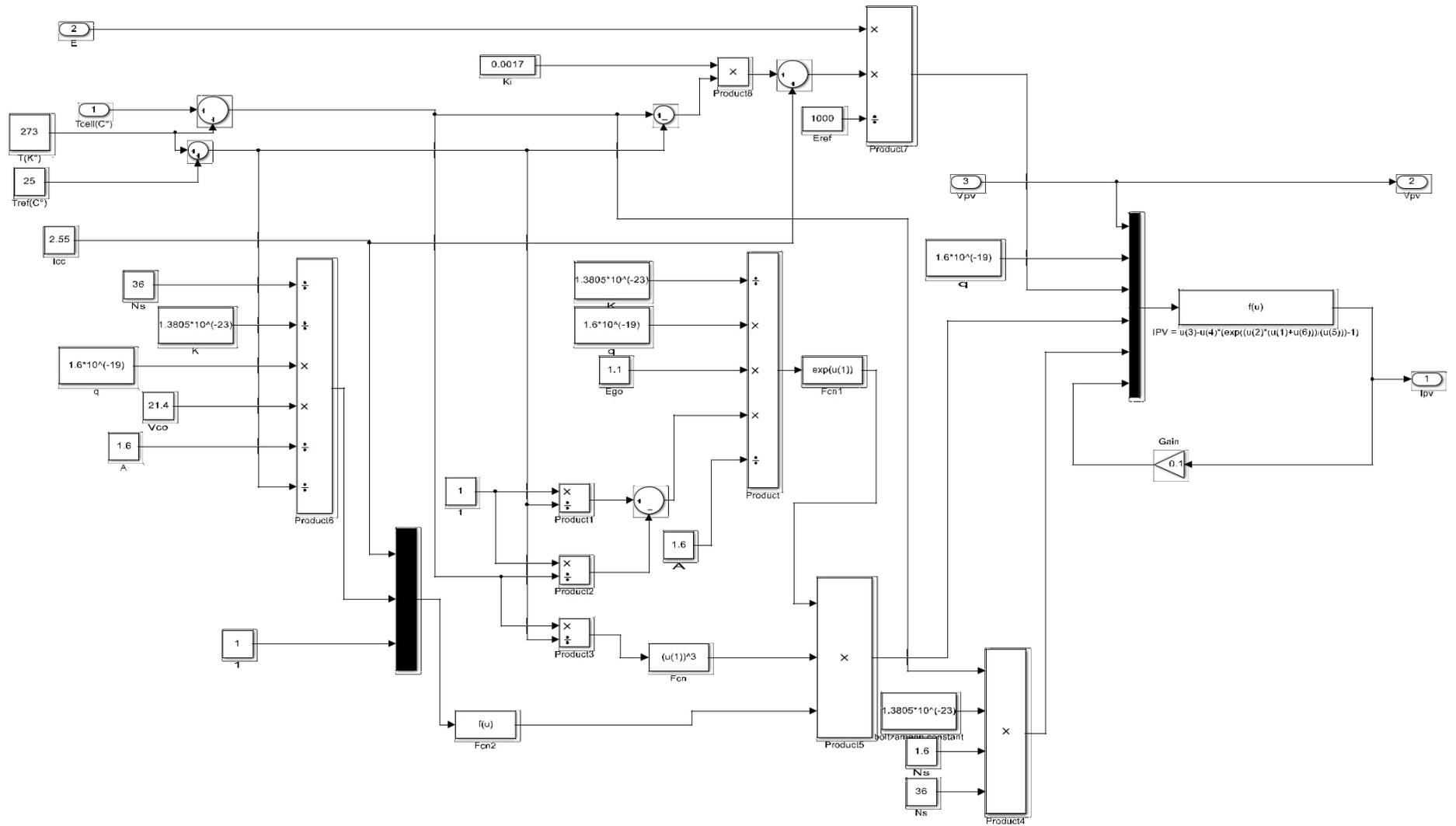
On note vers la fin, que les résultats de ce travail sont obtenus pour un module en silicium monocristallin fixe et mobile ont donné des bons résultats.

En effet, le développement d'autres travaux dans le même contexte est envisagé et concernant l'étude de l'un des trois restes technologie au site PV (polycristallin, amorphe et CdTe à couche minces) concernant l'influence de l'éclairement et la température sur ces différents paramètres ainsi que sur les performances de chaque module.

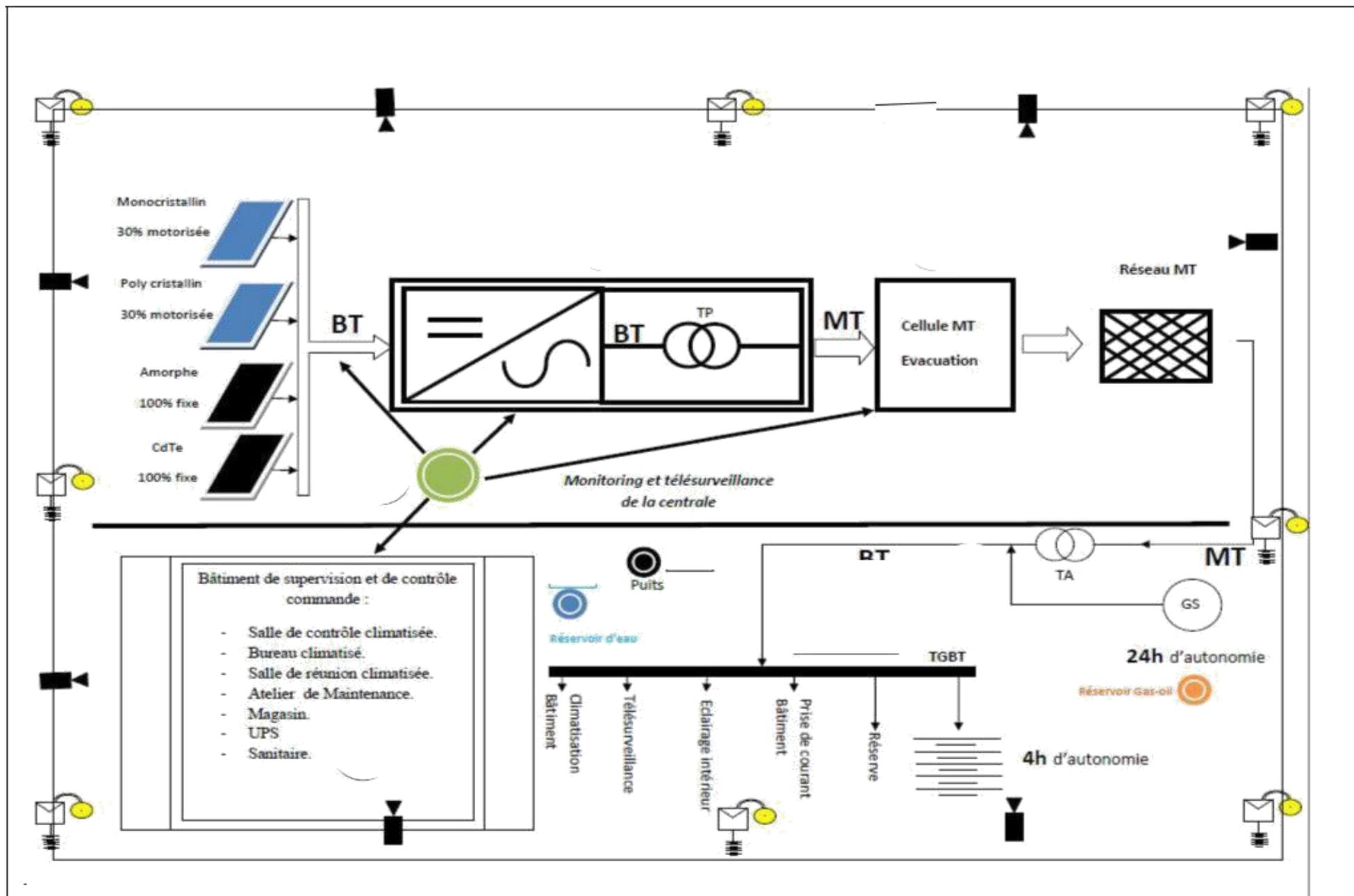
ANNEXE A- Schéma bloc d'une cellule PV sous Matlab/Simulink.



ANNEXE B- Schéma bloc d'un générateur PV sous Matlab/Simulink.



ANNEXE C- Schéma synoptique du site PV Oued Nechou à Ghardaïa [44]



ANNEXE D- Mesures effectuées au niveau du site PV Oued Nechou le 24/04/2016 [44]

Heure	MONOCRISTALLIN FIXE						MONOCRISTALLIN MOBIL					
	E	T	Vm	Im	Pm	PmS	E	T	Vm	Im	Pm	PmS
08:00	388,37	10,31	30,00	1,89	56,70	102,13	646,86	10,35	29,69	5,7	169,22	171,6
08:30	525,87	13,91	29,79	2,9	86,40	138,81	774,96	14,02	29,98	6,6	197,84	201,22
09:00	656,86	17,12	29,58	3,89	115,08	171,20	871,09	17,16	28,52	7,45	212,51	230,65
09:30	767,44	19,73	29,34	4,74	139,07	197,85	928,93	19,7	28,32	7,81	221,15	241
10:00	857,1	22,93	28,37	5,58	158,29	216,60	970,32	22,92	28,32	7,90	224,26	240,8
10:30	930,99	25,43	27,93	6,36	177,66	231,40	994,79	25,41	27,85	8,11	224,67	248
11:00	997,17	28,47	27,43	6,88	188,72	242,00	1010,58	28,46	27,34	8,25	225,59	245,2
11:30	1011,57	31,4	27,22	7,33	199,54	240,00	1011,66	33,2	27,15	8,25	224,01	236,31
12:00	1035,23	32,94	26,98	7,71	208,01	242,62	1035,62	34,93	27,14	8,27	224,41	234,8
12:30	1039,18	35,45	26,72	7,93	211,88	239,00	1039,64	35,41	26,88	8,3	223,06	233,64
13:00	1024,43	35,35	26,53	8,05	213,55	232,45	1023,16	37	26,93	8,26	223,42	230,75
13:30	989,63	36,35	26,75	7,91	211,62	224,61	1025,43	37,33	26,94	8,24	222,02	230,79
14:00	927,39	37,73	26,98	7,6	205,04	207,82	1019,1	37,72	27,17	8,24	223,88	228,62
14:30	841,16	39,44	26,98	7,24	192,09	187,30	1016,98	37,45	26,96	8,22	221,63	227,88
15:00	730,06	38,91	26,79	6,66	161,00	162,50	1007,76	38,92	27,19	8,08	219,68	224,79
15:30	622,57	36,37	22,59	6,51	146,23	162,50	988,24	36,36	26,72	8,05	215,09	222,54
16:00	500,16	36,34	27,14	5,34	114,51	109,52	975,97	36,34	27,41	7,98	218,76	221,45
16:30	393,86	33,93	27,38	4,47	96,92	88,32	921,71	33,92	27,40	7,46	204,37	213,13
17:00	281,73	32,27	27,85	3,46	67,35	61,00	832,68	32,28	27,36	6,96	190,43	194,43
17:30	164,47	28,47	28,90	2,49	45,08	34,36	722,44	28,48	28,11	5,99	168,36	173,08
18:00	92,8	24,96	27,80	1,59	17,23	19,22	548,5	24,95	28,59	4,67	133,53	133,19



BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Bernard Chabot**, "Rapport, Analysis of the Global Electricity Production up to 2013 With a Focus On the Contribution From Renewable" 2014.
- [2] **Kadraoui Hicham**, "Etude de Comparative Et rendement Energétique Des Différents Degrés De Concentration Des convertisseurs Thermique De l'Energie Solaire", Mémoire magister, Université Abou-Bakr Belkaid –Tlemcen, 2011 Algérie.
- [3] **Kalla Fayçal**, "Conversion Thermodynamique de l'Energie Solaire: Etude et Modélisation d'un Capteur Solaire", mémoire magistère, Université de Batna, Algérie 2014.
- [4] **Houhou Hatem**, "Etude Théorique Et Expérimentale Du Séchage Solaire De Certains Produits Agro-alimentaires", Mémoire Magistère, Université Mohamed Kheider – Biskra Algérie 2012.
- [5] **Boussalia Amer**, "Contribution A L'étude De Séchage Solaire De Produits Agricoles Locaux", Mémoire Magister, Université Mantouri Constantine, 2010, Algérie.
- [6] **Chekirou Wassila**, "Etude Et Analyse D'une Machine Frigorifique Solaire A Adsorption", Mémoire Doctorat, Université Mantouri-Constantine, Juin 2010 Algérie.
- [7] **Kabouche Azouz**, "Simulation Sous Trnsys16.1 D'un Appartement D'une Tour Multifonctionnelle A Constantine", Mémoire Magistère, Université Mantouri-Constantine, 2012, Algérie.
- [8] **Hallali Kamilia**, "Etude Comparative D'une Cellule Photovoltaïque", Mémoire Magistère, Université Mouloud Maamri Tizi Ouzou, 2012, Algérie.
- [9] **Paul Lucchese, Cea Et Claude Roy et Aurelien Million**, " La biomasse - Énergies Nouvelles et Renouvelables Un Élément Clé Au Service D'une Croissance Durable" Séminaire, Jeudi 28 mars à Vendredi 29 mars 2013 à Puteaux France.
- [10] **S. Ouali, A. Khellaf et K. Baddari**, "Etude Géothermique Su Sud De L'Algérie", Article, Revue des Energies Renouvelabl Vol. 9 N°4 (2006) 297 – 306, 2006 Algérie.
- [11] **Michel Benoit, Jean-François Dhédin et Mr Giovanni Mattarolo**, "Energies Marines

Hydrolienne Et Houlomotrice". Conférence Institut Coriolis, Université Paris Est, EDF R&D – CETMEF – ENPC 24 Septembre 2010, France.

[12] **Heinz-Joachim Barchmann (Allemagne) Mohamed Besaïh (Algérie), Leo Brincat (Malte), Sergio Paolo Francesco Silvestris**, "Potentiel De La Biomasse Dans Les Pays Méditerranéens", Projet De Rapport, Assemblée Parlementaire De L'union Pour La Méditerranée, Italie.

[13] **Sultan Ahmed Al Jaber, Tetsunari Iida, Pradeep Monga**, " Les énergies renouvelables " Rapport Mondial, REN21, 2012, France.

[14] **Saadi Souad**, "Effet Des Paramètres Opérationnels Sur Les Performances D'un Capteur Solaire Plan", Mémoire Magistère, Université Mantouri Constantine 2010 Algérie.

[15] **S. Ouali1, A. Khellaf et K. Baddari**, "Etude des ressources géothermiques du sud algérien", Article, Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°4 (2006) 297 – 306, Octobre 2006 Algérie .

[16] **S. Kherris , D. Zebbar M. Makhlouf S. Zebbar et K. Mostefa**, "Etude et analyse d'une machine frigorifique à absorption-diffusion solaire NH₃-H₂O-H₂, Article", Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°3 (2012) 373 – 382, Université de Tisimsilt, Octobre 2013 Algérie.

[17] **Diaf Said**, "Intégration Des Systèmes A Sources Renouvelables D'Energie Pour La Production D'Electricité En Algérie", Article, CDER, N° 19 En 2011, Algérie.

[18] **Naouel Hamdi**, "Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien", Mémoire Magister, Université Farhat Abbas Sétif, 2012, Algérie.

[19] **Amara Karima**, "Contribution A L'étude De Conception D'une Centrale Photovoltaïque De Puissance (1mw) Interconnectée Au Réseau De Distribution Electrique Moyenne Tension", Mémoire Magister, université Mouloud Maamri Tizi Ouzou, 2015, Algérie.

[20] **Hananou Fatiha Et Rouabah Aicha**, "Modélisation et Simulation D'un Système photovoltaïque", Mémoire master Académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2014, Algérie.

[21] **Maatallah Soraya**, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome" Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar, 2008, Algérie.

[22] **Jean-Louis Dufresne**, "La Détermination De La Constante Solaire", Article, Laboratoire De

Météorologie Dynamique, Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), 2008, P.36-43, 2008, France.

[23] **Zouagri Rima**, "Etude De Faisabilité Technique Et Economique Des Installations Solaires Thermiques Dans Un Bâtiment", Mémoire Magistère, Université El-Hadj Lakhdar-Batna, 2012, Algérie.

[24] **Benoit Beckers & Pierre Beckers**, "Calcul du rayonnement solaire atténué par l'atmosphère", Article, Février 2011, Université de Compiègne 2008, France.

[25] **Meziani Zahra**, "Modélisation De Modules Photovoltaïques", Mémoire Magistère, Université De Batna, 2012, Algérie.

[26] **A. Labouret, P. Cumunel, J-P. Braun, B. Faraggi**, "Etude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolienne" Mémoire magister Université Mouloud Maamri Tizi Ouzou 2012, Algérie.

[27] **Missoum Mohammed**, "Contribution De l'Energie Photovoltaïque Dans La Performance Energétique De l'Habitat à Haute Qualité Energétique En Algérie ", Mémoire Magistère, Université Hassiba Ben Bouali Chele, Décembre 2011, Algérie.

[28] **Mornay Thomas , Vernay Alexis ,Volle Marion**, " les cellule photovoltaïque", Article, Classes préparatoires CPE, Institution des Chartreux, Lyon, 2005, France.

[29] **M.L.Louazane**, "Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla", Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar-Batna 16/06/2008, Algérie.

[30] **Ren21**, "Renewables 2014 Global Status Report- page 49", Rapport, 2014, Paris France.

[31] **Bouayed Abderrahmen**, "Commande A Deux Axes D'un Panneau Photovoltaïque " , Thèse Master, Université Aboubaker Belkaied Telmcen, Juin 2014, Algérie.

[32] **A. Ould Mohamed Yahya1, A. Ould Mahmoud et I. Youm**, "Etude Et Modélisation D'un Générateur Photovoltaïque", Article, Revue Des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 473 – 483, Université de Nouakchott, Mauritanie, Septembre 2011, Mauritanie.

[33] **Bendjellouli Zakaria**, "Contribution à La Modélisation D'une Cellule Solaire", Mémoire Magister, Université de Bechar, Juin 2009, Algérie.

[34] **Hassina Derbal-Habak**, "Cellules Solaires Photovoltaïques Plastiques Nano-Structures",

Thèse Doctorat, Université d'Angers, 2009, France.

[35] **Mohamed Ansoumane Camara**, "Modelisation Du Stockage De L'Energie Photovoltaïque Par Super-Condensateurs", Thème Doctorat, Université Paris-Est, 2011, France.

[36] **Soufiane Abada**, "Etude Et Optimisation D'un Générateur Photovoltaïque Pour La Recharge D'une Batterie Avec Un Convertisseur Sepic", Mémoire pour l'obtention du grade de Maîtres-Sciences (M.Se.), Université Laval Québec, 2011 Canada.

[37] **Kanj Bilal**, "Techniques Intelligentes pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Système Photovoltaïque" Rapport, Université Libanaise, 2012, Liban.

[38] **Alain Belbao Learetta**, "Réalisation De commande MPPT Numérique" Rapport de Stage Projet Fin d'Etude au niveau de CNRS, Septembre 2006, France.

[39] **Pankaj Yadav, Brijesh Tripathi, Makarand Lokhande, and Manoj Kumar**, "Effect Of Temperature And Concentration On Commercial Silicon Module Based Low-Concentration Photovoltaic System" Article, Journal Of Renewable Sustainable Energy 5, 013113 (2013).

[40] **Salaheddine Bensalem**, "Effets De La Température Sur Les Paramètres Caractéristiques Des Cellules Solaires" Mémoire Magister, Université Ferhat Abbas- Setif, Algérie 2011.

[41] **Pandiarajan Natarajan**, "Performance Improvement Of PV Module At Higher Temperature Operation" Article, IRACST – Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ), ISSN: 2250-3498, Vol 2, N° 5, Octobre 2012.

[42] **Bencherif Mohammed**, "Modélisation De Systèmes Energétiques Photovoltaïques Et Eoliens Intégration Dans Un Système Hybride Basse Tension" Mémoire Doctorat, Université Aboubarer Belkaid Tlemcen, Algérie.

[43] **K. Gairaa et S. Benkacali**, "Modélisation numérique des irradiations globale et diffuse au site de Ghardaïa", Article, Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°1 (2008) 129 – 136 Algérie.

[44] **Groupe ABB Spa Italie-ABB Algérie**, "Rapport, Centrale En panneaux Photovoltaïques De Ghardaïa 1100 kWc", 2012, Algérie.

[45] **CDER**, "Rapport de la commission nationale de développement des énergies renouvelable en Algérie horizon 2030", 2015, Algérie.