



REPUBLIQUE DU NIGER  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR DE LA  
RECHERCHE ET DE L'INNOVATION



Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi  
Faculté des Sciences et Techniques  
Département de Physique

**MÉMOIRE**

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DE MASTER

**Spécialité : Système Énergétique Durable pour Société en Développement  
(2SED)**

**Thème : Etude de l'optimisation du rayonnement solaire reçu par le  
Module SA-80 : cas de Maradi**

Présenté par : **MELE BOULOU KARAM Ari Fantami**

Soutenu le 15/10/2020 devant le jury composé de :

Monsieur **LAOUALI** Dungall professeur Titulaire à l'Université Abdou Moumouni de Niamey/Niger, **Président** ;

Monsieur **BOUKAR** Makinta Professeur Titulaire à l'Université Abdou Moumouni de Niamey/Niger **Superviseur** ;

Monsieur **ELHADJI AMADOU** Hamissou, Maître-Assistant à l'Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi/Niger, **Encadreur**.

**Année académique : 2019-2020**

## Dédicace

À notre défunte mère FALMATA, à titre posthume, qu'Allah lui accorde ses miséricordes ;

A notre père, pour son amour et son affection sans faille ;

Et à toute notre famille, pour son effort et soutien inconditionnels, ainsi pour les conseils prodigués.

## Remerciements

Au terme de ce travail, d'abord nous adressons nos remerciements à notre Directeur de mémoire, docteur ELH AMADOU Hamissou pour la confiance, sa disponibilité, son aide et orientation.

Je remercie également le Professeur BOUKAR Makinta de l'Université Abdou Moumouni de Niamey pour avoir accepté de Superviser ce mémoire et le Professeur LAOUALI Dungall de L'Université Abdou Moumouni de Niamey pour avoir accepté de présider mon Jury de mémoire de Master

Puis à l'endroit de l'ensemble du corps enseignant de l'UDDM, en particulier à M. Mahamadou Hamidine, que vont nos remerciements ;

Sans oublier notre défunte mère (qu'elle repose en paix), notre père et tous les membres de notre famille pour leurs prières constantes ;

Messieurs Tar Abdourahamane, Abba Malan Kimé, Abbatcha Abba Kaga, Ibrahim Ari Koutalé, Katchiella Abba Gana (sa famille aussi), Kaka Modou Adji, Hassan Katchiella Laoula, Malam Boukar Malan Awa, Boukar K. Kaka Kiari et l'ensemble de nos collègues et amis pour leurs soutiens et conseils précieux.

Enfin, nous adressons nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué ou facilité la réalisation de ce modeste travail d'une manière ou à une autre, de près ou de loin.

# Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR LE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE.....	3
1.1. Introduction.....	4
1.2. Soleil.....	4
1.2.1. Ensoleillement.....	5
1.2.2. Durée d'ensoleillement.....	5
1.2.3. Taux d'ensoleillement.....	5
1.3. Rayonnements solaires.....	5
1.3.1. Constante solaire.....	5
1.3.2. Radiation solaire.....	6
1.4. Différents types de rayonnement solaire.....	7
1.4.1. Rayonnement direct ( $G_d$ ).....	7
1.4.3. Rayonnement réfléchi ou albédo du sol ( $G_r$ ).....	8
1.4.4. Rayonnement global ( $G_g$ ).....	8
1.5. Energie solaire photovoltaïque.....	8
1.5.1. Cellule photovoltaïque.....	8
1.5.1.1. Silicium.....	9
1.5.1.2. Les couches minces.....	9
1.5.1.3. Cellules organiques.....	10
1.5.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	10
1.5.3. Module photovoltaïque.....	11
1.5.3.1. Association de cellules en série.....	12
1.5.3.2. Association des cellules en parallèle.....	12
1.5.4. Générateur photovoltaïque.....	12
1.5.4.1. Sécurité d'un générateur photovoltaïque.....	12
1.6. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire.....	13
1.6.1. Avantages.....	13
1.6.2. Inconvénients.....	14
1.7. Conclusion partielle.....	14
CHAPITRE 2 : ETUDE D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	15
2.1. Introduction.....	16
2.2. Effet photovoltaïque.....	16

2.3. Modélisation d'un générateur photovoltaïque.....	16
2.3.1. Cas d'une cellule idéale. ....	17
2.3.2. Cas d'une cellule réelle. ....	18
2.4. Présentation du Module SA-80 .....	19
2.5. Modélisation du Module PV .....	20
2.6. Influence de l'irradiation et de la température.....	21
2.6.1. Influence de l'irradiation.....	21
2.6.2. Influence de la température .....	22
2.7. Conclusion partielle.....	24
<b>CHAPITRE3 : MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>25</b>
3.1. Introduction .....	26
3.2. Présentation du site de mesures.....	26
3.3. Matériels de Mesure .....	26
3.3.1. Pyranomètre .....	26
3.3.1.1. Description.....	26
3.3.1.2. Caractéristiques techniques d'un Pyranomètre .....	27
3.3.2. Module solaire photovoltaïque.....	28
3.3.2.1. Description.....	28
3.3.2.2. Caractéristiques techniques du Module .....	29
3.3.3. Anémomètre à hélice Testo410-1 .....	29
3.3.3.1. Vitesse d'air .....	30
3.3.3.2Température .....	30
3.3.3.3. Données techniques :.....	30
3.3.4. Multimètre Digital DT9205A.....	30
3.3.5. Données récapitulatif de l'ensemble de matériels Utilisés.....	31
3.4. Les Méthodes .....	32
3.5. Conclusion partielle.....	33
<b>CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSIONS .....</b>	<b>34</b>
4.1. Introduction .....	35
4.2. Présentations des résultats .....	35
4.3. Influence de Rayonnement sur les paramètres caractéristiques selon les différents angles d'inclinaisons .....	37
4.3.1. Cas de Module SA-80 avec position variable .....	37

4.3.1.1. Graphique courant-rayonnement.....	37
4.3.1.2. Graphiques tension-rayonnement.....	39
4.3.1.3. Graphiques Rayonnement-Puissance .....	42
4.3.2. Cas de Module SA-80 avec position fixe.....	44
4.3.2.1. Graphique courant-rayonnement.....	44
4.3.2.2. Graphiques tension-rayonnement.....	47
4.3.2.3. Graphiques Puissance-Rayonnement .....	49
4.4. Conclusion partielle.....	51
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....	52
Références bibliographiques .....	54
ANNEXE .....	A

## Listes des Figures

Figure1-1: Caractéristiques des différentes longueurs d'ondes .....	7
Figure1-2 : Différentes composantes du rayonnement solaire.....	7
Figure1-3 : Image d'une cellule .....	8
Figure1- 4 et 5 : Cellule polycristallin et monocristalline.....	9
Figure1-6 : Cellule en couche mince.....	9
Figure1-7 : Image d'une cellule organique .....	10
Figure 1-8 : Schéma de principe de fonctionnement.....	10
Figure 1-9 : Schéma de constitution d'un module solaire PV.....	11
Figure 1-10 : Schéma de système de protection d'un module PV .....	13
Figure2-1 : Câblage des cellules dans un module [14] .....	17
Figure2-2 : Schéma bloc du générateur photovoltaïque.....	17
Figure2-3 : Modèle d'une cellule idéale .....	17
Figure2-4 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle .....	18
Figure2-5 : Caractéristique V-I du module PV selon la variation de l'éclairement.....	22
Figure2-6 : Caractéristique V-P du module PV selon la variation de l'Eclairement .....	22
Figure2-7 : Caractéristique V-I du module PV selon la variation de température.....	23
Figure2-8 : Caractéristique V-P du module PV selon la variation de température.....	23
Figure3-1 : Carte géographique de Maradi .....	26
Figure 3-2 et 3 : Image du pyranomètre a l'UDDM .....	27
Figure 3-4 : Photo d'un module PV SA-80 a l'UDDM .....	28
Figure 3-5 et 6 : Photo Anémomètre à hélice Testo410-1 de Labo de l'UDDM.....	29
Figure 3 -7 et 8 : Photo du Multimètre Utilisé dans ce cadre du travail .....	31
Figure3-9 : Position d'Angle 90° et Figure3-10 : Position d'Angle 60° .....	33
Figure3-11 : Position d'Angle 30° et Figure3-12 : Position d'Angle 15° .....	33
Figure 4-1 : Caractéristique du courant selon le rayonnement à l'UDDM .....	37
Figure 4-2 : Caractéristique du courant selon le rayonnement à l'UDDM .....	38
Figure 4-3: Caractéristique du courant selon le rayonnement à l'UDDM .....	38
Figure 4-4 : Caractéristique du courant selon le rayonnement à l'UDDM .....	38
Figure 4-5 : Courbes combinées des courants selon le rayonnement à l'UDDM .....	39
Figure4-6: Influence de Rayonnement sur la Tension avec angle de 15° à l'UDDM.....	40
Figure4-7 : Influence de Rayonnement sur la Tension avec angle 30° à l'UDDM.....	40
Figure4-8 : Influence de Rayonnement sur la Tension avec angle 60° à l'UDDM.....	40

Figure4-9 : Influence de Rayonnement sur la Tension avec angle 90° à l'UDDM.....	41
Figure4-10 : Influence de rayonnement sur la Tension à l'UDDM .....	41
Figure4-11 : Evolution de la puissance produite selon le rayonnement à 15° à l'UDDM.....	42
Figure4-12 : Evolution de la puissance produite selon le rayonnement à 30° ) l'UDDM .....	42
Figure4-13 : Evolution de la puissance produite selon le rayonnement à 60° à l'UDDM.....	43
Figure4-14 : Evolution de la puissance produite selon le rayonnement à 90° à l'UDDM.....	43
Figure4-15 : Evolution de la puissance produite selon le rayonnement à l'UDDM .....	43
Figure4-16: caractéristique du courant selon le rayonnement à l'UDDM .....	45
Figure4-17 : caractéristique du courant selon le rayonnement à l'UDDM .....	45
Figure4-18 : caractéristique du courant selon le rayonnement à l'UDDM .....	45
Figure4-19 : caractéristique du courant selon le rayonnement à l'UDDM .....	46
Figure4-20 : caractéristique du courant selon le rayonnement à l'UDDM .....	46
Figure4-21 : caractéristique de tension selon le rayonnement à l'UDDM.....	47
Figure4-22: caractéristique de tension selon le rayonnement à l'UDDM.....	47
Figure4-23: caractéristique de tension selon le rayonnement à l'UDDM.....	48
Figure4-24: caractéristique de Tension selon le rayonnement à l'UDDM .....	48
Figure4-25 : Influence de rayonnement sur la tension à l'UDDM.....	48
Figure4-26 : Evolution de la puissance produite selon le rayonnement à l'UDDM .....	49
Figure4-27 : Evolution de la puissance produite selon le rayonnement à l'UDDM .....	49
Figure4-28 : Evolution de la puissance produite selon le rayonnement à l'UDDM .....	50
Figure4-29 : Evolution de la puissance produite selon le rayonnement .....	50
Figure4-30 : Evolution de la puissance produite selon le Rayonnement à l'UDDM.....	50

## Liste des tableaux

Tableau3-1: Les caractéristiques techniques .....	27
Tableau3-2 : présente les caractéristiques technique d'un Module S-8 .....	29
Tableau 3-3 : Caractéristiques technique pour la mesure de la vitesse de l'air.....	30
Tableau 3-4 : Caractéristiques technique pour la mesure de la température de l'air.....	30
Tableau3-5: données techniques : .....	30
Tableau3-6 : récapitulatif de l'ensemble de matériels Utilisés .....	32
Tableau4-1 : Récapitulatif des données recueillies sur le Module SA-80 position variable au site de l'UDDM.....	36
Tableau4-2: Récapitulatif de données recueillies sur le Module SA-80 avec position fixe.....	36

# Listes des abréviations et symboles

## Abréviations

<i>CdTe</i> :	Tellure de Cadmium.
<i>CIS</i> :	di-séléniure de cuivre et d'indium.
<i>GPV</i> :	Générateur Photovoltaïque.
<i>Imp</i> :	Courant maximal.
<i>KWc</i> :	Kilowatt Crête.
<i>MPP</i> :	Point de fonctionnement optimal.
$N_p$ :	Nombre de modules en Parallèles
$N_s$ :	Nombre de module en séries.
<i>Pmax</i> :	Puissance Maximale
<i>PV</i> :	Photovoltaïque.
<i>Sia</i> :	Silicium amorphe.
<i>STC</i> :	Conditions de Test Standards « standard Test Conditions.
<i>UDDM</i> :	Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi

## Symboles

$E$ :	Eclairement absorbé par la cellule
$E_g$ :	Energie de Gap de la cellule.
$E_{ref}$ :	Eclairement de référence
$F'(X_n)$ :	Dérivé de la fonction.
$G_g$ :	Rayonnement globale.
$I$ :	Courant fourni par la cellule.
$I_d$ :	Courant absorbé par la diode
$I_0$ :	Courant inverse de saturation de la diode
$I_{ph}$ :	Photo courant.
$I_{pv}$ :	Courant produit par la cellule PV.
$I_s$ :	Courant de saturation de la diode.
$I_{sc}$ :	Courant de court-circuit.
$K$ :	Constant de Boltzmann ( $1,38.10^{-23}J/K$ ).
$N$ :	Facteur d'idéalité da la photopile.
$n$ :	Facteur de qualité de diode.

$N_{PP}$ :	Nombre de modules connectés en parallèle (dans notre cas=1).
$N_{SS}$ :	Nombre de modules connectés en série (dans notre cas=1).
$q$ :	Charge de l'électron ( $1,6.10^{-19}C$ )
$R_p$ :	Résistance parallèle
$R_s$ :	Résistance Série.
$R_{sh}$ :	Résistance Shunt.
$T_{ref}$ :	Température de référence 298k (25°c)
$T$ :	Température de la cellule en kelvin
$V$ :	Tension au borne de la cellule.
$V_d$ :	Tension au borne de diode.
$V_{mp}$ :	Tension Maximale.
$V_{oc}$ :	Tension a circuit ouvert
$V_t = KT/q$ :	Tension thermique.
$w_0$ :	Angle horaire au coucher du soleil.
$\mu$ :	Coefficient de température du photo-courant (ou courant de circuit).
$X_n$ :	Présente itération
$X_{n+1}$ :	Itération suivante

## Résumé

L'exploitation de l'énergie solaire est une option prometteuse qui peut répondre à la demande sans cesse croissante en énergie dans le monde avec plusieurs avantages tels que la réduction de la pollution et la disponibilité à grande échelle.

Les travaux de ce mémoire portent sur l'étude de l'optimisation du rayonnement solaire reçu par le module SA-80 : cas de Maradi. Dans un premier temps, l'état de l'art sur ; les différentes composantes du rayonnement solaire, les modules photovoltaïques, les différents types de matériaux utilisés dans la fabrication des modules PV et sur le fonctionnement d'un générateur PV a été effectué. Puis une simulation est effectuée sur Matlab/Simulink pour observer le comportement du module à la variation de l'éclairement et de la température. De même des données expérimentales ont été collectées en faisant varier la position et/ou l'angle d'inclinaison des modules. Ensuite ces données expérimentales obtenues sont utilisées pour effectuer des graphiques. Enfin les résultats suivants sont obtenus ; pour un système suivant l'évolution du soleil le meilleur d'angle d'inclinaison est de  $30^\circ$  et quant à un système fixe orienté plein sud le meilleur d'angle d'inclinaison est de  $15^\circ$ .

### Mots clés

Optimisation, Rayonnement solaire, Module Photovoltaïque, Angle d'inclinaison, Simulation.

## **Abstract**

Harnessing solar energy is a promising option that can meet the ever-increasing demand for energy in the world with several advantages such as reduced pollution and widespread availability.

The work of this dissertation concerns the study of the optimization of solar radiation received by SA-80 module: the case of Maradi. First, the state of the art on the different components of solar radiation, photovoltaic modules, the different types of materials used in the manufacture of PV modules and on the operation of the PV generator was carried out on Matlab/Simulink to observe the behavior of the Module with the variation in illumination and Temperature. Likewise the experimental data collected by varying the position and/or angle inclination of Modules. Then these experimental data obtained used to make graphics. Finally, the following results obtained: for a system following the evolution of the sun the best tilt angle is  $30^{\circ}$  and for a fixed system oriented due south the best tilt angle is  $15^{\circ}$ .

### Key words

Optimization, solar radiation, photovoltaic module, angle of inclination, Simulation.

---

## INTRODUCTION GENERALE

---

## Introduction

L'évolution scientifique et technique n'est rendue possible que grâce à la maîtrise de l'énergie, source vitale pour toute activité. Mais l'utilisation de l'énergie pose de problèmes environnementaux graves du fait des pollutions émises surtout par l'utilisation irrationnelle des sources fossiles notamment le pétrole, le gaz naturel, le charbon...etc. [1]. Ainsi depuis la crise pétrolière de 1973, les énergies renouvelables sont indiquées comme alternative et occupent une place particulière dans la recherche pour énergie.

L'énergie solaire fait partie des énergies renouvelables les plus utilisées. Cela est dû à la maîtrise de sa technologie et sa disponibilité à grande échelle. Dans ce contexte notre étude s'intéresse à la filière Photovoltaïque qui semble une des plus prometteuses. L'énergie solaire photovoltaïque est obtenue par la conversion directe de rayonnement solaire en électricité par des matériaux semi-conducteurs. Afin d'optimiser sa production, plusieurs Travaux d'étude ont été mené notamment dans le cadre de : l'optimisation de la production l'énergie photovoltaïque, la recherche de technique de poursuite de point de puissance maximale (MPP) ou encore sur l'effet de rayonnement et de la température sur les paramètres caractéristiques.

La production d'électricité basée sur l'énergie solaire photovoltaïque présente un potentiel important parmi toutes les énergies renouvelables disponibles. Elle est propre, silencieuse, gratuite et disponible sur une très grande partie de notre globe et ne présente aucun risque d'épuisement [2].

De par son installation et sa maintenance facile, l'énergie photovoltaïque est incontestablement une solution technique et économique la plus adaptée pour les sites isolés et accidentés.

Aujourd'hui le système de conversion de l'énergie solaire photovoltaïque dans le contexte nigérien en général et en particulier dans le cas de Maradi manque d'une bonne étude d'orientation et d'inclinaison. C'est dans ce cadre que nous projetons le travail de recherche du présent mémoire de Master.

Ce travail s'articulera autour de quatre chapitres : le premier porte sur les notions relatives aux différents types de rayonnements solaires, les différentes filières technologiques ainsi que le principe de fonctionnement des modules photovoltaïques. Le deuxième chapitre présente l'étude et la modélisation d'un module photovoltaïque. Le troisième chapitre est consacré aux différents matériels utilisés. Et, avant la conclusion générale, le dernier chapitre présente les résultats et discussions des données acquises sur les deux modules, l'un avec suivi du soleil et l'autre avec position fixe.

---

## CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

---

## **1.1. Introduction**

L'énergie solaire est une source d'énergie à laquelle tout le monde a accès grâce à sa disponibilité à grande échelle, sur l'ensemble du globe. Grâce à celle-ci, il est possible de produire trois types d'énergies : l'énergie calorifique avec les installations solaires thermiques (chauffe-eau solaire ou climatiseur solaire), l'énergie électrique avec les installations solaires photovoltaïques et le solaire à concentration thermodynamique [1].

L'énergie solaire photovoltaïque a surtout été développée au tout début pour l'alimentation des applications autonomes n'ayant pas accès au réseau électrique comme les satellites ainsi que pour les sites (habitations) isolés. Aujourd'hui, l'électricité photovoltaïque est présente dans plusieurs applications avec diverses puissances comme les calculatrices, les montres, téléphones portables, ainsi que d'autres objets d'utilisation courante.

Aussi, l'électricité produite par les cellules photovoltaïques peut alimenter les charges continues sans aucune difficulté. Plus récemment avec l'émergence d'installations photovoltaïques connectées au réseau de distribution, le photovoltaïque a connu un développement important en tant que moyen de production d'électricité [2].

Ce chapitre fait un rappel sur l'énergie solaire avant de présenter les différents types de rayonnement solaire, les filières technologiques des cellules photovoltaïques et de donner l'aperçu sur l'avantage et l'inconvénient d'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque.

## **1.2. Soleil**

Le soleil est une étoile, c'est un astre de forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint 1 391 000 km. Il est situé à une distance de 149 598 000 km de la terre et est composé de matière gazeuse, notamment de l'hydrogène et l'hélium. Il est le siège des réactions de fusion nucléaire permanentes. Sa température au centre est autour de  $10^7\text{K}$  [3].

Il est particulièrement important car il fournit l'essentiel de l'énergie que les planètes du système solaire reçoivent [2]. Depuis toujours, l'homme cherche des moyens pour utiliser l'énergie émise par le soleil qui est l'étoile la plus proche de la terre. Mais pour l'essentiel, les exploitations qu'on en fait sont directes, comme c'est le cas en agriculture à travers les photosynthèses ou dans d'autres applications de séchage et de chauffage pour autant artisanales qu'industrielles. L'énergie solaire est une énergie disponible en abondance sur la surface terrestre et accessible par tous.

### 1.2.1. Ensoleillement

Aussi appelé insolation, l'ensoleillement est la quantité du rayonnement solaire que reçoit une surface donnée pour une période bien définie. Il est exprimé en watts-heure par mètre carré ( $\text{Wh/m}^2$ ) dans le cas de l'industrie solaire. Cette mesure divisée par le temps d'enregistrement fournit la mesure de densité de puissance appelée l'éclairement énergétique/irradiante, exprimée en watts par mètre carré ( $\text{W/m}^2$ ) [4].

### 1.2.2. Durée d'ensoleillement

La durée d'ensoleillement ou la durée d'insolation  $S$  correspond au nombre d'heures pendant la journée où le rayonnement solaire parvient au sol sans subir de déviation. Elle peut être égale à la durée du jour  $S_0$ , c'est-à-dire du lever au coucher du soleil si le ciel est entièrement dégagé pendant toute la journée. En absence permanente des nuages, la durée d'insolation est pratiquement égale à la durée du jour appelée aussi durée astronomique ou théorique du jour [5] :

L'équation de la durée du jour est :

$$S_0 = \frac{2}{15} w_0 \quad (1-1)$$

Avec

$w_0$  : l'angle horaire au coucher du soleil

$$w_0 = \cos^{-1}(-\tan \theta \tan \delta) \quad (1-2)$$

Où,  $\theta$  est la latitude du lieu et  $\delta$  la déclinaison ;

### 1.2.3. Taux d'ensoleillement

Le taux d'insolation  $\sigma$  est le rapport entre la durée d'insolation  $S$  et la durée maximale d'ensoleillement  $S_0$ . Si le ciel est clair, sans nuages pendant toute la journée, le sol reçoit le rayonnement direct pendant toute la durée du jour qui correspond à la durée maximale d'ensoleillement.

Le taux  $\sigma$  est donné par la relation suivante :  $\sigma = \frac{S}{S_0}$  (1-3)

## 1.3. Rayonnements solaires

### 1.3.1. Constante solaire

Le rayonnement solaire est la seule source d'énergie externe de notre planète. La constante solaire est l'énergie solaire reçue par unité de temps à la limite supérieure de l'atmosphère sur une surface unité perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance terre-soleil qui est égale à sa valeur moyenne [6]. Elle est indépendante des conditions météorologiques, mais dépend de la distance terre-soleil qui varie quelque peu au cours de l'année compte tenu de légère excentricité de l'orbite terrestre. La valeur moyenne de la constante solaire a été

estimée à  $1367 \text{ W/m}^2$ . Cette valeur peut être calculée en fonction de numéro du jour de l'année  $N_j$  par la relation suivante [6] :

$$C_s = C_{so} \left[ 1 + 0.33 \cos\left(\frac{360N_j}{3.5}\right) \right] \quad (1-4)$$

### 1.3.2. Radiation solaire

L'énergie émise par le soleil nous parvient sous forme de rayonnements électromagnétiques se propageant à la vitesse de la lumière et dont l'ensemble forme le rayonnement solaire qui constitue la source externe notable de l'atmosphère. La théorie corpusculaire de Planck prévoit que tout rayonnement de fréquence ( $\nu$ ) peut être considéré comme un flux de photons dont l'énergie élémentaire ( $E$ ) est directement proportionnelle à cette fréquence. De ce fait, ce sont les rayonnements de courte longueur d'onde (ou haute fréquence) qui sont les plus énergétiques [7] :

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot \nu}{\lambda} \quad (1-5)$$

Où :

$h$  : est la constante de Planck ;

$\nu$  : est la fréquence

$c$  : est la vitesse de la lumière.

$\lambda$  : est la longueur d'onde

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à  $5800^\circ\text{K}$ . Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AMO. Sa distribution en énergie est répartie en :

- ✓ Ultraviolet UV  $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$  6.4% ;
- ✓ Visible  $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$  48.0% ;
- ✓ Infrarouge IR  $0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$  45.6%.

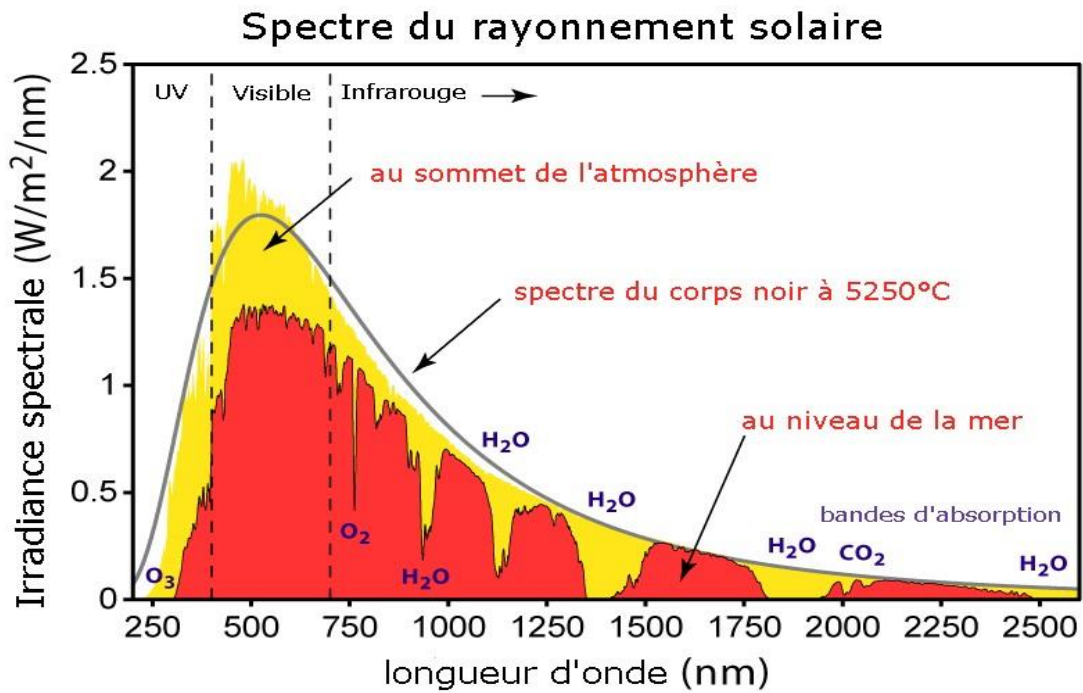


Figure 1-1: Caractéristiques des différentes longueurs d'ondes [4]

#### 1.4. Différents types de rayonnement solaire

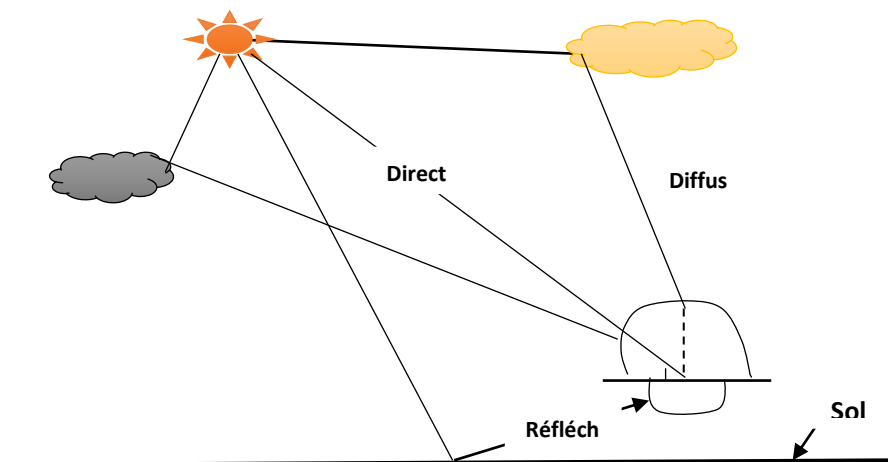


Figure 1-2 : Différentes composantes du rayonnement solaire

##### 1.4.1. Rayonnement direct ( $G_d$ )

C'est l'ensemble des rayonnements qui parviennent à la surface de la terre sans subir de véritables altérations ou être diffus par l'atmosphère. Ces rayons directs sont parallèles les uns des autres.

#### 1.4.2. Rayonnement diffus ( $G_s$ )

C'est le rayonnement (lumière) diffusé essentiellement par l'atmosphère.

#### 1.4.3. Rayonnement réfléchi ou albédo du sol ( $G_r$ )

C'est le rayonnement réfléchi par le sol ou par les objets se trouvant à la surface de la terre. Il est important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (neige, eau).

#### 1.4.4. Rayonnement global ( $G_g$ )

Il est défini comme étant la somme de rayonnement direct et diffus :  $G_g = G_d + G_s$ .

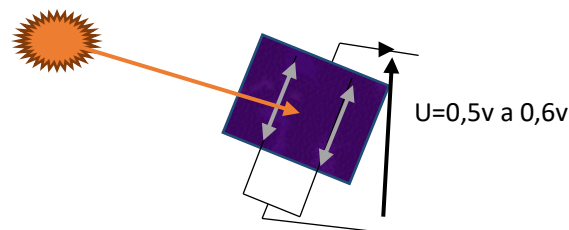
### 1.5. Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par la transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles sur un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire chez un particulier ou dans une centrale solaire photovoltaïque. L'installation solaire peut alimenter, au besoin sur place (en association avec un moyen de stockage), ou être injecté après transformation en courant alternatif dans un réseau de distribution électrique. Cette transformation est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible.

Le mot photovoltaïque vient du mot « photos » (du grec « photos » qui signifie lumière) et du « volt » (patronyme du physicien Alessandro volta qui a contribué de manière très importante à la recherche pour l'électricité) [2].

#### 1.5.1. Cellule photovoltaïque

C'est l'élément de base des panneaux solaires photovoltaïques. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur à base de silicium délivrant une tension de l'ordre de 0,5 à 0,6 V.



**Figure 1-3:** Image d'une cellule

La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de silicium (matériau semi-conducteur) :

- ✓ Une couche dopée avec du bore qui possède moins d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée positivement (zone p) ;

- ✓ Une couche dopée avec du phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée négativement (zone N).

Ces cellules sont réalisées à partir des matériaux semi-conducteurs. Il existe trois principales technologies : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques.

#### 1.5.1.1. Silicium

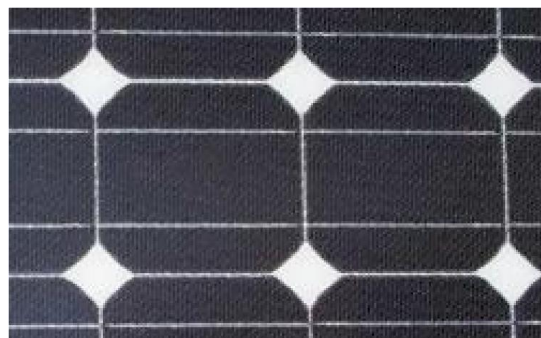
Il est composé essentiellement de silicium monocristallin et de silicium polycristallin qui se différencie par leurs états de pureté, leurs coûts de fabrication et leurs rendements dont ceux de monocristallin sont les plus élevés.



**Figure 1-4 et 5:** Cellule polycristalline et monocristalline [2]

#### 1.5.1.2. Couches minces

La technologie de couches minces fait appel par essence à des procédés industriels de fabrication visant à réduire l'épaisseur de cellules. Mais le problème de base demeure le coût, notamment le prix élevé de kilowatt crête. Le silicium amorphe est ainsi la technologie principalement utilisée de couches minces.



**Figure 1-6:** Cellule en couche mince [2]

### 1.5.1.3. Cellules organiques

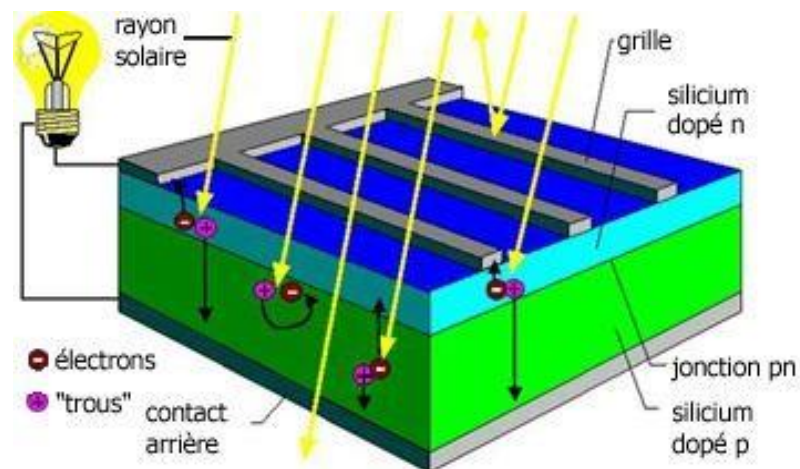
Cette technologie est nouvelle par rapport aux deux autres. Mais elle attire particulièrement l'attention des chercheurs par son rendement prometteur et à son évolution rapide.



**Figure 1-7:** Image d'une cellule organique [2]

### 1.5.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur composé essentiellement de silicium. L'objectif de cette cellule est de convertir l'énergie en provenance du soleil en électricité. Lorsqu'un photon de lumière arrive au niveau de la cellule, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron modifiant ainsi les charges électriques. Les atomes chargés positivement vont alors dans la zone P et les électrons chargés négativement dans la zone N. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire, une tension électrique est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque.



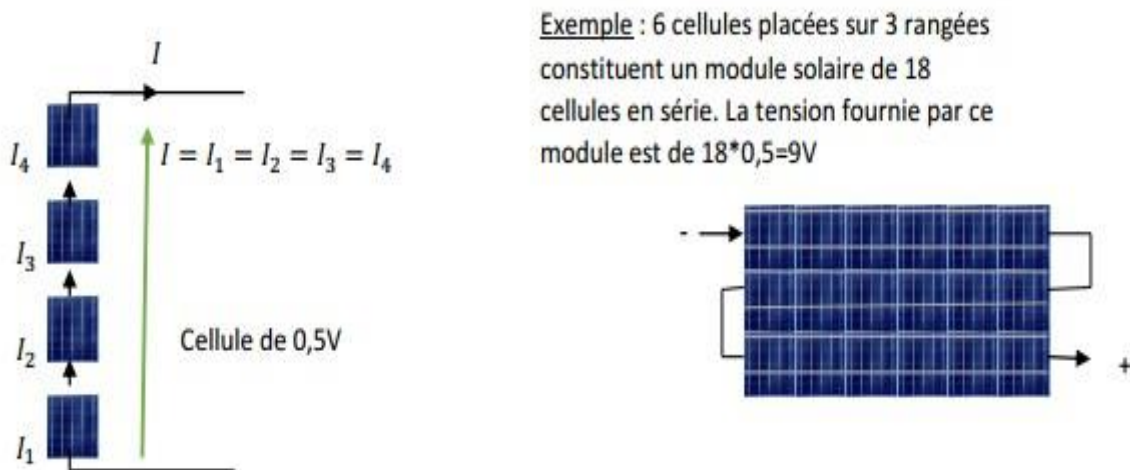
**Figure 1-8:** Schéma de principe de fonctionnement [8]

A la surface, le contact électrique (électrode négative) est établi par la grille afin de permettre à la lumière du soleil de passer à travers le contact et de pénétrer dans le silicium. Les cellules solaires sont recouvertes d'une couche antireflet qui les protège et réduit les pertes par réflexion. C'est cette couche qui donne aux cellules solaires leur aspect bleu foncé.

### 1.5.3. Module photovoltaïque

Le module photovoltaïque est un assemblage de plusieurs cellules solaires (photopiles) dont le but est de produire une puissance électrique exploitable lorsqu'il est exposé au rayonnement solaire. La tension et le courant générés par une cellule photovoltaïque correspondent à la puissance électrique de la cellule comprise entre 1 et 3 watt sous une tension inférieure à 1 volt ; ceux-ci sont insuffisants pour faire fonctionner un appareil.

Pour avoir une puissance utilisable, il faut donc associer les cellules entre elles pour former un module (panneau). Une association de cellules en série permet d'augmenter la tension alors qu'une association en parallèle permet d'accroître le courant sous une même tension. La puissance crête obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité [9].



**Figure 1-9:** Schéma de constitution d'un module solaire PV

### 1.5.3.1. Association de cellules en série

La tension générée par une cellule photovoltaïque qui est de l'ordre de 0,5 à 0,6 volt est trop limitée. Pour produire une puissance exploitable, il faut donc associer les cellules solaires afin de former un module. Un module photovoltaïque est constitué généralement de 36 à 72 cellules connectées en série. Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par un même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions élémentaires de chaque cellule. Le courant de court-circuit et la tension circuit ouvert d'une association série de  $N_s$  cellules sont donnés par [2, 10] :

- ✓ Le courant de court-circuit d'un module reste le même  $I_{SCC} = I_{SC}$  ;
- ✓ La tension de circuit ouvert d'un module devient  $V_{SOC} = N_s V_{OC}$ .

### 1.5.3.2. Association des cellules en parallèle

L'association de plusieurs cellules en parallèle permet la sommation de l'ampérage généré par chacune des cellules sans variation de tension. Le courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert d'une association parallèle de  $N_p$  cellules sont donnés par :

- ✓ Le courant de court-circuit d'un module devient  $I_{SSC} = N_p I_{SC}$  ;
- ✓ La tension de circuit ouvert d'un module reste la même  $V_{SOC} = V_{OC}$ .

### 1.5.4. Générateur photovoltaïque

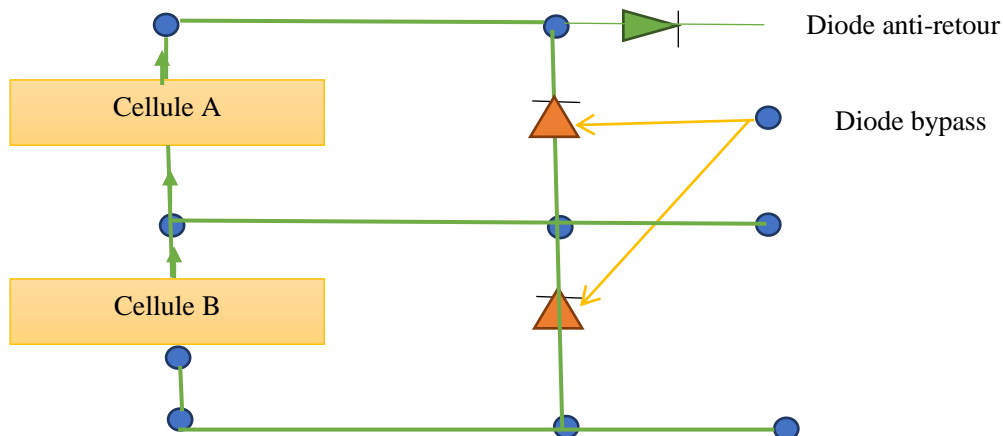
Un générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle. La connexion en série de plusieurs cellules forme une branche où on a une augmentation de tension pour un même courant, un assemblage de plusieurs branches de cellules en parallèle forme un module ou on a un accroissement du courant et une conservation de tension [11]. Plusieurs modules mis en série-parallèle forme un panneau solaire. Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [12].

#### 1.5.4.1. Sécurité d'un générateur photovoltaïque

Pour concevoir une installation photovoltaïque, il est nécessaire d'assurer la protection électrique de l'installation dans le but d'augmenter sa durée de vie en évitant essentiellement des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage (passage brusque de nuage, nid d'oiseau...).

Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles [13] :

- ✓ La protection en cas de connexions en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans GPV (diode anti-retour) ;
- ✓ La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds.



**Figure 1-10:** Schéma de système de protection d'un module PV

On peut ainsi évoquer le rôle essentiel d'intervention de l'électronique de puissance dans la conception de générateur photovoltaïque.

Diode « by-pass » : la mise en série des cellules peut être dangereuse lorsque l'une d'entre elles se retrouve à l'ombre. Elle va s'échauffer et se détruire. En effet, une cellule masquée voit l'intensité qui la traverse diminuer. De ce fait, elle bloque la circulation de l'intensité normale produite par les autres modules. Le courant passe par le diode by-pass pour cause d'ombrage. La tension aux bornes de cette cellule masquée augmente, d'où apparition d'une surchauffe : c'est l'effet d'auto polarisation inverse. Une telle cellule est appelée "Hot spot". Pour supprimer ce problème et protéger la cellule « masquée », on place des diodes «by-pass » en antiparallèles sur 18 ou 24 cellules de façon à court-circuiter les cellules ombrées.

## 1.6. Avantages et inconvénients de l'utilisation des panneaux solaires

### 1.6.1. Avantages

- une installation photovoltaïque est appropriée à des différents types des régions, qu'elles soient isolées que non. Cela est dû au fait qu'elle ne comporte pas de pièces mobiles. D'où son usage sur les engins spatiaux et sur le toit des maisons même dans le milieu urbain ;

- sa conception sous forme de modules permet aux panneaux un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Ils peuvent être dimensionnés pour les installations allant de quelque milliwatt au Mégawat ;
- le coût de fonctionnement d'un système photovoltaïque est très bas car il ne nécessite pas d'entretien particulier. Il n'a pas besoins de combustible, ni de transport et encore moins de personnel hautement qualifié ;
- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [14].

### **1.6.2. Inconvénients**

- la production des modules photovoltaïques relève de la haute technologie et le coût de fabrication est très élevé ;
- le rendement réel de conversion d'énergie d'un module est très faible car il de l'ordre de 10 à 15% avec une limite théorique pour une cellule monocristalline de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesels que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées. Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique est nécessaire, le coût du générateur est accru [15] ;
- la conservation de l'énergie électrique pose la nécessité d'utilisation des batteries qui coûtent chères.

### **1.7. Conclusion partielle**

Dans ce chapitre, nous avons évoqué les différentes composantes du rayonnement solaire et les modules PV. Nous avons donné les différents types de matériaux utilisés dans la fabrication des modules PV et le fonctionnement du générateur PV.

---

## CHAPITRE 2 : ETUDE D'UN MODULE PHOTOVOLTAIQUE

---

## **2.1. Introduction**

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre au maximum quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou panneau photovoltaïque [16].

L'étude d'un Module photovoltaïque passe d'abord par l'obtention de son modèle. Et pour cela, il faut retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conducteurs qui sont à la base de leurs réalisations [14].

Dans la littérature qui est assez large sur ce sujet, on rencontre plusieurs modèles qui se distinguent par les paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant final du générateur.

## **2.2. Effet photovoltaïque**

L'énergie solaire photovoltaïque est l'énergie issue de conversion directe de rayonnement solaire en électricité par le biais des cellules solaires. Ce phénomène est rendu possible grâce à l'effet photovoltaïque, découvert en 1839 par le physicien français Alexandre Edmond Becquerel.

Un panneau solaire fonctionne par l'effet photovoltaïque, c'est-à-dire par la création d'une force électromotrice liée à l'absorption d'énergie lumineuse dans un solide. C'est le seul moyen connu actuellement pour convertir directement la lumière en électricité.

## **2.3. Modélisation d'un générateur photovoltaïque**

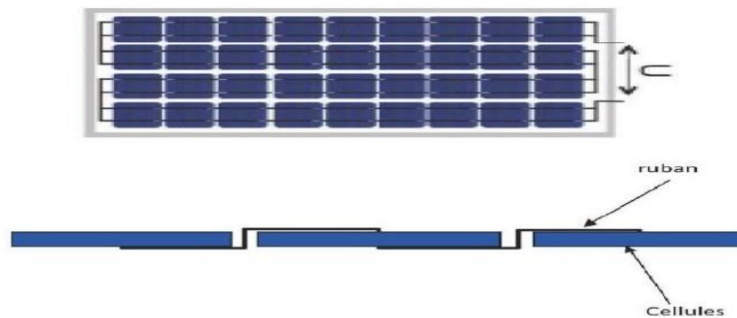
Un module photovoltaïque est une association de cellules solaires élémentaires afin d'obtenir des caractéristiques désirées tels la puissance, le courant de court-circuit ou la tension à circuit ouvert.

En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèles pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et des spectres solaires.

La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série [15].

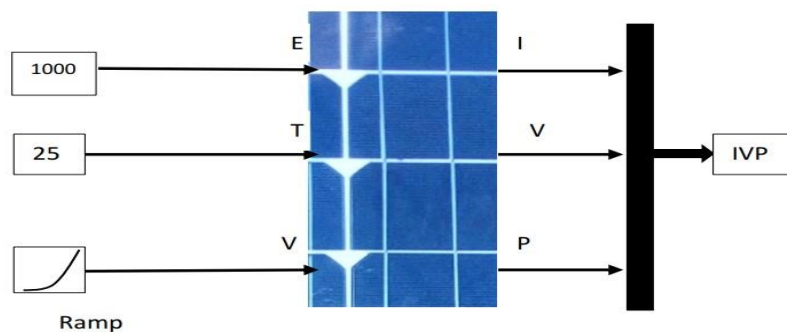
Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- ✓ protection des cellules contre les agents atmosphériques ;
- ✓ protection mécanique et support ;
- ✓ connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.



**Figure 2-1:** Câblage des cellules dans un module [14, 16]

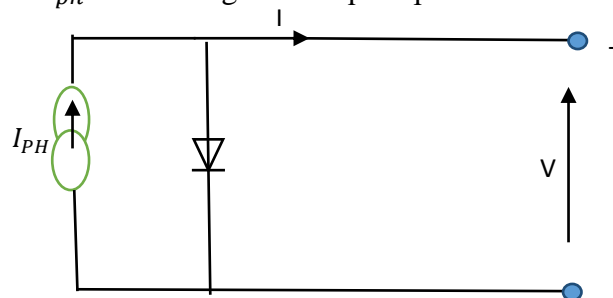
Le schéma électrique d'un générateur photovoltaïque est réduit en un simple schéma bloc (figure) à deux entrées (E : éclairement et T : température de la cellule) et deux sorties (I le courant et V : la tension).



**Figure 2-2:** Schéma bloc du générateur photovoltaïque

### 2.3.1. Cas d'une cellule idéale.

Dans ce cas, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant en parallèle avec une diode. Ce générateur délivre un courant  $I_{ph}$  selon la figure 2-3 qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [17]



**Figure 2-3:** Modèle d'une cellule idéale

Les équations retenues de ce modèle sont : [2]

$$\checkmark I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (2-1)$$

Le courant  $I_{ph}$  est assimilé au courant  $I_{sc}$  avec  $I_{pv} = 0$ , courant de court-circuit obtenu en court-circuitant la charge.

$$\checkmark I_{ph} = I_{sc} = \frac{E}{E_{ref}} \quad (2-2)$$

$E$  : Eclairement absorbé par la cellule ;

$E_{ref}$  : Eclairement de référence (1000w/m<sup>2</sup>)

$$\checkmark I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (2-3)$$

$I_0$  : courant de saturation inverse de la diode ;

$$\checkmark V_t = \frac{NKT}{q} \quad (2-4)$$

$V_t$  : tension thermique ;

$N$  : facteur d'idéalité de la photopile ;

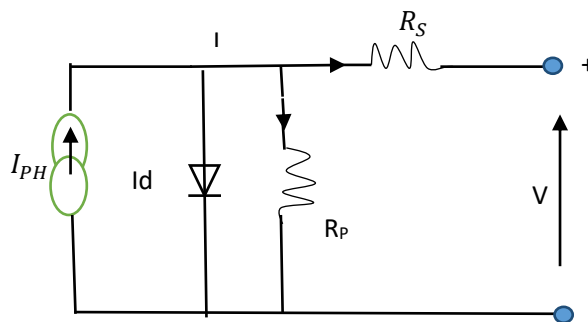
$K$  : constant de Boltzmann (1,38.10<sup>-23</sup>J/K) ;

$T$  : la température de cellule en Kelvin

$q$  : Charge de l'électron (1,6.10<sup>-19</sup>C)

### 2.3.2. Cas d'une cellule réelle.

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dus à la fabrication et est représentée sur la figure 2-4. Ce schéma équivalent est constitué d'une diode ( $d$ ) caractérisant la jonction, une source de courant ( $I_{ph}$ ) caractérisant le photo-courant, une résistance ( $R_s$ ) représentant les pertes par effet joules et une résistance shunte ( $R_{sh}$ ) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieur à ( $R_s$ ) [18].



**Figure 2-4:** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

Le courant produit par le générateur est donné par les équations suivantes [14] :

$$\checkmark I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{q(V - R_s I)}{NKT}\right) - 1 \right] - \frac{V - IR_s}{R_{sh}} \quad (2-5)$$

$$\checkmark I_{ph} = \frac{E}{E_{ref}} [I_{ph_{ref}} + \mu(T - T_{ref})] \quad (2-6)$$

$$\checkmark I_s = I_{s_{ref}} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \cdot \exp\left(\frac{qE_g}{NK} \left[\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right]\right) \quad (2-7)$$

Où :

$I$  : courant fourni par la cellule [A]

$V$  : Tension aux bornes de la cellule [V]

$I_{ph}$  : photo courant [A], proportionnel à l'irradiation  $E$ , avec correction selon  $T$

$I_s$  : courant de saturation de la diode [A], dépendant de la température

$\mu$  : coefficient de température du photo-courant (ou courant de circuit), il est souvent donné par le fabricant, il est en général positif mais très faible.

$E_g$  : Energie de Gap de la cellule. (Silicium cristallin  $E_g = 1,12$  eV, silicium amorphe  $E_g = 1,7$ eV ; CIS = 1,03eV, Cdte=1,5eV.

Les conditions de référence  $E$  et  $E_{ref}$  sont les conditions extérieures pour lesquelles sont spécifiées les données de base utilisées pour l'établissement du modèle ( $V_{co}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{max}$ ,  $I_{max}$ ). Ce sont soit les spécifications du fabricant, toujours données aux STC (Standard Test Conditions, 1000w/m<sup>2</sup>, 25°C) soient les valeurs issues d'une mesure du modèle [6].

#### 2.4. Présentation du Module SA-80

Ce module de fabrication allemande adapté pour l'Afrique, possède 39 cellules en silicium polycristallin et les caractéristiques suivantes fournies par le constructeur sous un ensoleillement de 1000W/m<sup>2</sup> et à 25°C avec AM=1,5. Pour réaliser la modélisation nous avons utilisé MATLAB comme Logiciel de simulation.

Puissance optimale	$P_{max} = 80W$
Tension optimale	$V_{mp} = 17.6V$
Courant optimal	$I_{mp} = 4.568 A$
Tension a circuit ouvert	$V_{oc} = 21V$
Courant de court-circuit	$I_{sc} = 5.12$
Taux Tolérance	$\pm 5\%$

## 2.5. Modélisation du Module PV

Le courant de saturation de Diode est donné par [14]

$$\checkmark I_o = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{V+I.R_s}{n.K.T}\right)} - 1 \quad (2-8)$$

Pour calculer  $I$  on considère  $R_p = \text{inf}$  donc  $I_p = 0$  dans ce cas,

$$\text{l'équation } I_{pv} = I_{ph} - I_d \text{ devient } I = I_{pH} - I_o \cdot \left(\exp\left(\frac{V+I.R_s}{V_t}\right) - 1\right) \quad (2-9)$$

Avec  $R_s$  dans le point  $V_{oc}$  :

$$\checkmark dI = 0 - I_o \cdot \left(\frac{V+I.R_s}{V_t}\right) \cdot \exp\left(\frac{V+I.R_s}{V_t}\right) \quad (2-10)$$

$$\checkmark \text{Donc } R_s = -\frac{dI}{dV} - \frac{n.V_t}{I_o \cdot \exp\left(\frac{V+I.R_s}{n.V_t}\right)} \quad (2-11)$$

Telle que :

$$\checkmark R_s = -\frac{dI}{dV} \Big|_{V=V_{co}} - \frac{n.V_t}{I_o \cdot \exp\left(\frac{V+I.R_s}{n.V_t}\right)} \quad (2-12)$$

Toutes les constantes issues de ces équations sont données par le fabricant.

La méthode utilisée pour la simulation de notre Modèle est celle de Newton Raphson qui est décrite de la manière suivante :

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)} \quad (2-13)$$

$$V = V_{co}$$

Avec :

$f'(X)$  : La dérivée de la fonction

$X_n$  : La présente Itération

$X_{n+1}$  : L'itération suivante

$$\checkmark f(I) = I_{sc} - I - I_o \cdot \left[\exp\left(q \cdot \frac{V+I.R_s}{n.V_t}\right) - 1\right] \quad (2-14)$$

$$\checkmark I_{n+1} = I_n - \frac{I_{sc} - I_n - I_o \cdot \left(\frac{V+I_n.R_s}{n.V_t}\right) - 1}{-1 - I_o \cdot \left(\frac{R_s}{n.V_t}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{V+I_n.R_s}{n.V_t}\right)\right]} \quad (2-15)$$

$$\checkmark I_{sc}(T) = I_{sc}(T_{ref}) \cdot [1 + \mu(T - T_{ref})] \quad (2-16)$$

$\mu$  : le coefficient de variation du courant en fonction de température

$K_V$  : le coefficient de variation de la tension en fonction de température

$T_{ref}$  : la Température de référence 298 K (25°C)

$E$ : l'irradiation Solaire

$$\checkmark I_{pH} = I_{phref} + \mu \cdot (T - T_{ref}) \cdot \left( \frac{E}{E_{ref}} \right). \quad (2-17)$$

Le courant de saturation de  $T_{ref}$  s'écrit :

$$\checkmark I_0 = I_0(T_{ref}) \cdot \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{n}} \cdot \left[ \exp \left( -\frac{qE_{ref}}{n.K} \right) \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right]. \quad (2-18)$$

On peut écrire l'équation de  $I_{pH}$

$$\checkmark I_0 = \frac{I_{sc} + \mu \cdot (T - T_{ref})}{\exp \left( \frac{V_{co} + K_v \cdot (T - T_{ref})}{n \cdot V_t} \right) - 1} \quad (2-19)$$

Pour la modélisation ou schéma block (voir annexe) on aura [12] :

$$\checkmark I_m = I_{pv} \cdot N_{pp} - I_0 \cdot N_{pp} \cdot \exp \left[ \frac{q \cdot T \cdot N_{ss}}{n \cdot K \cdot N_s} \cdot \left( V + \frac{I \cdot R_s}{N_{pp}} \cdot N_{ss} \right) - 1 \right]. \quad (2-20)$$

$N_{SS}$  : Nombre de modules connectés en série (dans notre cas=1).

$N_{PP}$  : Nombre de modules connectés en parallèle (dans notre cas=1).

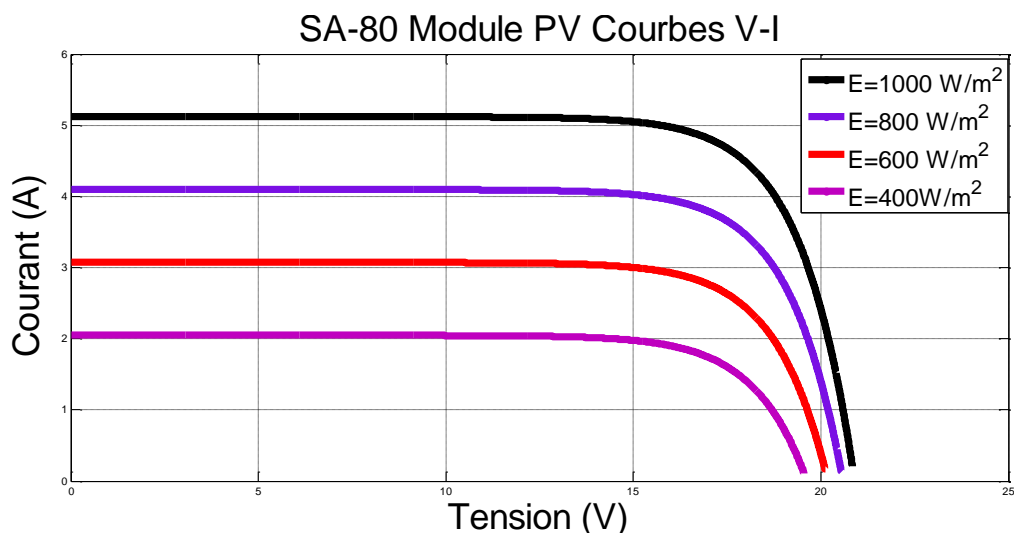
$N_s$  : Nombre de cellules connectées en Série.

## 2.6. Influence de l'irradiation et de la température sur la puissance du module

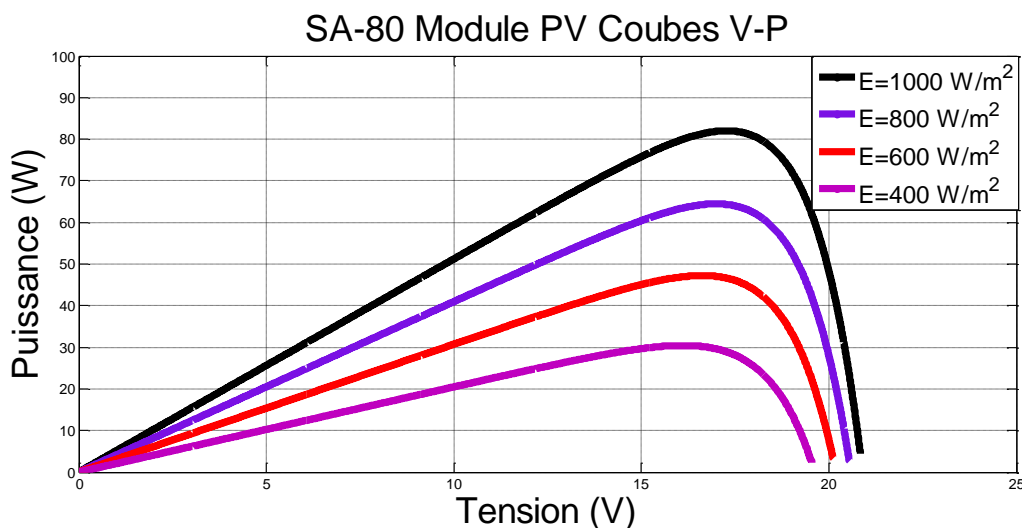
L'objectif ici est de constater la réaction du module SA-80 polycristallin lorsqu'il est soumis à différents éclairagements et températures.

### 2.6.1. Influence de l'irradiation

Les courbes ci-dessous présentent les caractéristiques I-V et V-P du panneau SA-80 sous la température de 25°C avec une variation de l'éclairement. Le courant  $I_{sc}$  varie directement avec la variation de rayonnement lumineux, quant à la tension elle varie relativement faible. Ainsi on remarque que le courant optimal est très sensible à l'éclairement, par contre la tension optimale varie très peu avec l'éclairement.



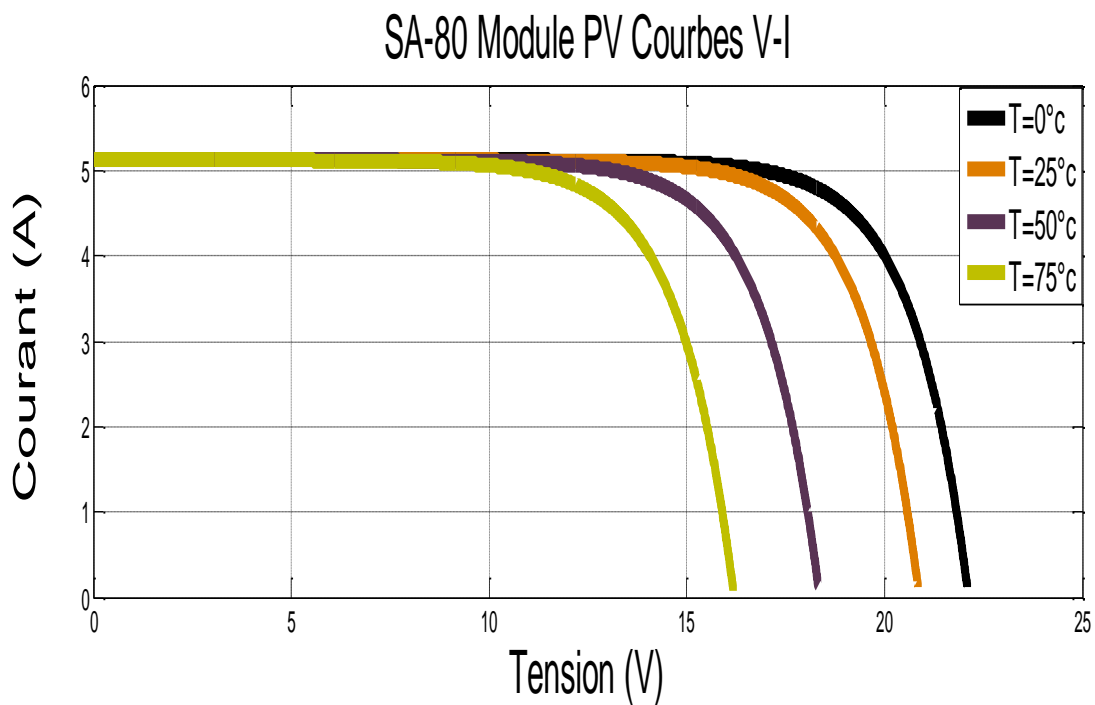
**Figure 2-5:** Caractéristique V-I du module PV selon la variation de l'éclairement



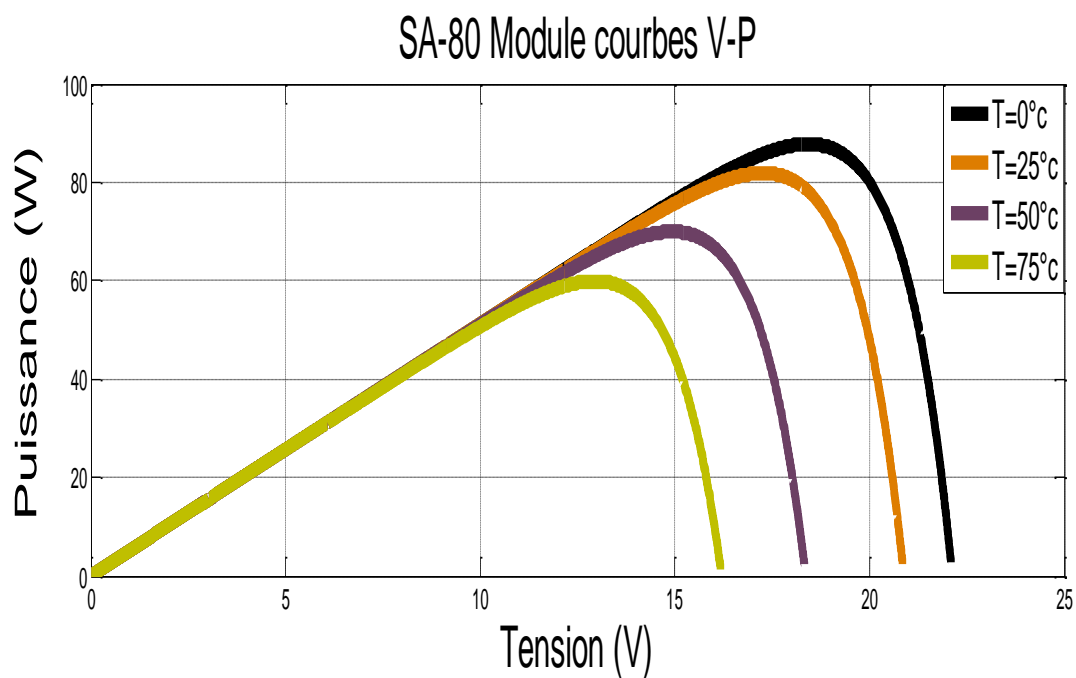
**Figure 2-6:** Caractéristique V-P du module PV selon la variation de l'Eclairement

### 2.6.2. Influence de la température

Les figures (2-7 et 2-8) présentent les caractéristiques V-I et V-P d'un module SA-80 pour un éclairement  $E=1000\text{W/m}^2$  et pour différentes températures. On constate que la tension à circuit ouvert diminue quand la température augmente, mais le courant de court-circuit augment très légèrement. La diminution du courant de saturation est la principale cause de la chute de courant à basse température. Ainsi la température influe de manière négative sur la tension à circuit ouvert, d'où l'augmentation de la température favorise la chute de puissance.



**Figure 2-7:** Caractéristique V-I du module PV selon la variation de température



**Figure 2-8:** Caractéristique V-P du module PV selon la variation de température

## **2.7. Conclusion partielle**

Dans ce chapitre nous avons tout d'abord présenté les caractéristiques d'une cellule idéale et celles d'une cellule réelle, par la suite nous avons montré comment augmenter la puissance d'un module photovoltaïque en associant plusieurs cellules solaires en série/parallèle.

Afin d'avoir le comportement du module, nous avons modélisé et simulé ce dernier dans l'environnement MATLAB/Simulink pour observer l'influence de l'éclairement et de la température sur le rendement des cellules.

Les résultats obtenus montrent qu'une augmentation de l'éclairement entraîne une augmentation de l'intensité du courant et une diminution de l'éclairement entraîne une diminution de l'intensité du courant. Mais une augmentation de la température se traduit par une diminution de la tension. On déduit de ce fait que l'énergie produit par un module PV est fonction de l'éclairement et de la température.

---

## CHAPITRE 3 : MATERIELS ET METHODES

---

### 3.1. Introduction

Pour mesurer les paramètres liés au rayonnement solaire, plusieurs matériels et logiciels ont vu jour afin de concevoir un système utilisant les données solaires. L'objectif de ce chapitre est de présenter les matériels et la méthode utilisés pour effectuer les mesures.

### 3.2. Présentation du site de mesures

Notre site de mesure est situé au sein de nouveau site (13°49' N ; 7°13' E) en face de laboratoire de physique de l'Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi au Niger.

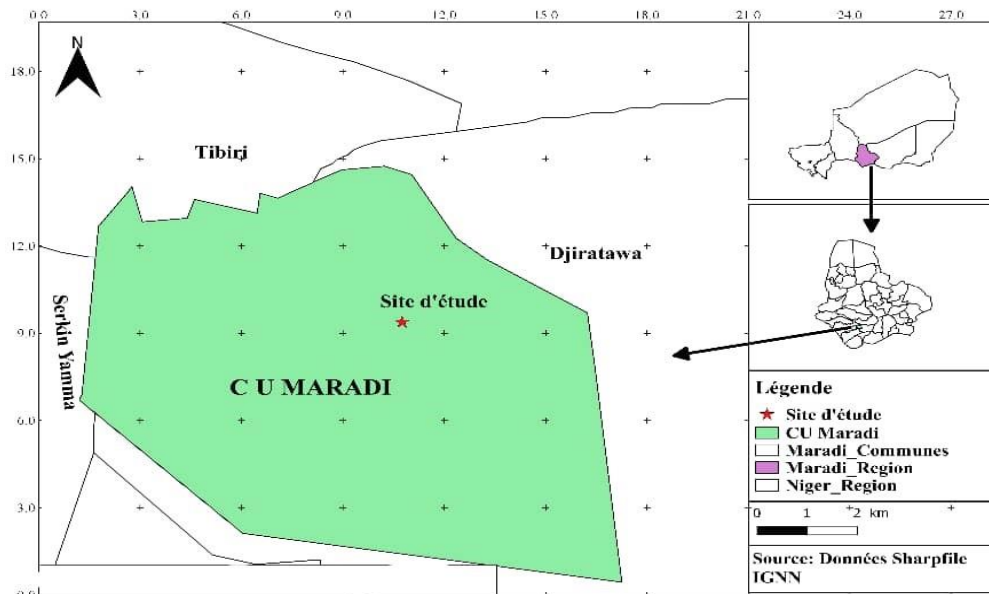


Figure 3-1: Carte géographique de Maradi

### 3.3. Matériels de Mesure

#### 3.3.1. Pyranomètre

Des nombreux appareils sont été conçus spécifiquement pour la mesure et l'enregistrement des données relevant de potentiels solaires dont le pyranomètre. Ce dernier permet de mesurer le rayonnement global pendant une période donnée. Dans le cadre de ce travail l'appareil utilisé est le pyranomètre PCE-SPMI qui effectue une mesure directe de l'énergie solaire dans une position bien définie. Les valeurs des mesures obtenues servent à vérifier le degré d'efficacité des modules ou des installations photovoltaïques.

##### 3.3.1.1. Description

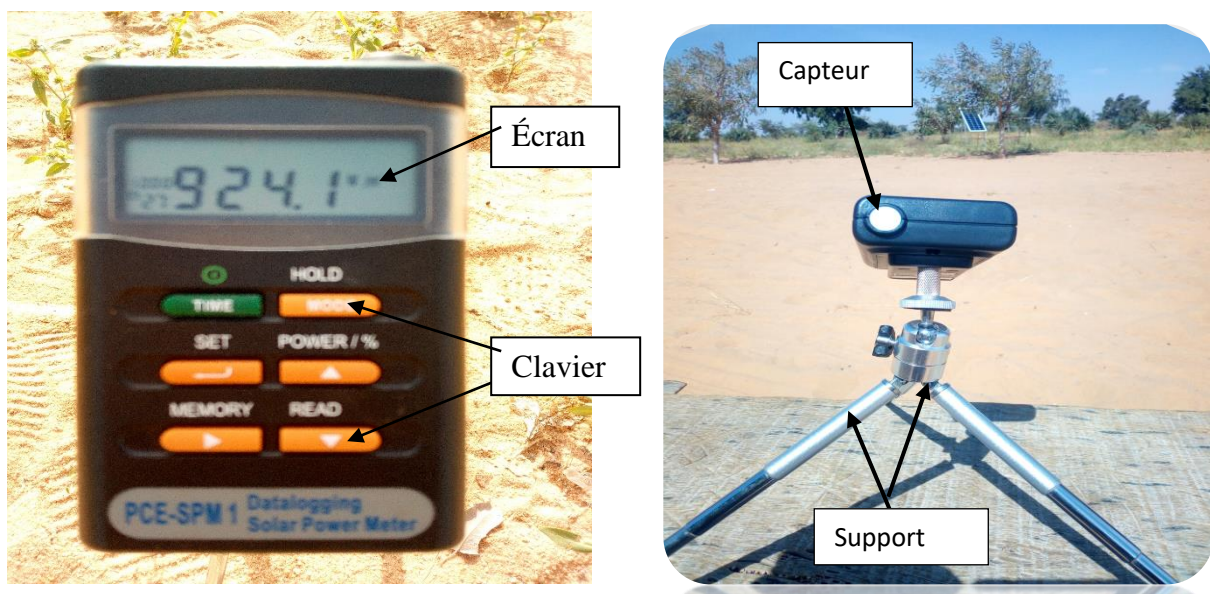
Le pyranomètre est l'un des instruments les plus couramment utilisés pour les mesures de rayonnements d'origines solaires reçues à la surface horizontale ou inclinée. Il est constitué d'un écran, d'un clavier et d'un capteur qui sera monté sur un support et est doté d'un câble de connexion pour ordinateur.

### 3.3.1.2. Caractéristiques techniques d'un Pyranomètre

Le pyranomètre a une plage de mesure de 0 à 2000 W/m<sup>2</sup>. Sa résolution est de ± 10 W/m<sup>2</sup>. Il est composé d'un Ecran LCD avec les conditions d'opération suivante : plages de température est de 0 à 50°C avec l'humidité maximum inférieure à 80 % H.r alimentée par quatre (4) piles au lithium-ion de 1,5v chacune pour une durée d'usage de 16 jours et pèse une masse de 165gramme (g). Son dimensionnement est de 11x64x34mm

**Tableau 3-1:** Caractéristiques techniques

Plage de mesure	0 à 2000 W/m <sup>2</sup>
Résolution	1 W/m <sup>2</sup>
Précision	± 10 w/m <sup>2</sup> ; 0 à ± 5%
Plage spectrale	400 à 1100 nm±
Mémoire	32000 valeurs de mesure
Part de mesure	réglable
Transfert de données	Port de série RS-232
Ecran	LCD
Plage de température ambiante	0 à 50°C
Humidité maximum	<80% H.r0
Alimentation	4 batteries de 1,5 V Ion-Lithium
Dimensions	11x64x34 mm
Poids	165 g



**Figure 3-2 et 3:** Photos du pyranomètre à l'UDDM

### 3.3.2. Module solaire photovoltaïque

Le moyen connu pour la conversion directe de rayonnement solaire en électricité est l'utilisation des cellules solaires. Le montage de ces cellules en série/parallèle donne naissance à un module photovoltaïque. Pour mener à bien ce travail, deux Modules solaires photovoltaïques de type polycristalin ont été utilisés.

#### 3.3.2.1. Description

Le module polycristallin utilisé est le Model SA-80 de fabrication Allemande avec un bon coefficient tension-température car il est favorable à une utilisation à des températures élevées, performant et donne un bon rendement même en faible irradiation avec une sensibilité élevée à tout le spectre solaire. Ce module comporte 39 cellules assemblées en série/parallèle dans le but d'atteindre les caractéristiques désirées. Il a une boîte de raccordement multifonctionnelle scellée étanche pour la sécurisation, un cadre robuste en aluminium anodisé pour assemblage facile, compatible avec une grande diversité de structures de montage du marché. La face supérieure est recouverte de verre à haute transmissibilité pour une rigidité accrue et une excellente résistance aux impacts.



**Figure 3-4:** Photo d'un module PV SA-80 à l'UDDM

### 3.3.2.2. Caractéristiques techniques du Module

**Tableau 3-2:** Caractéristiques technique d'un Module S-8

Eclairement	$E=1000 \text{ W/m}^2$
Température	$T=25^\circ\text{C}$
Masse d'air	$AM= 1,5$
Puissance maximale	$P_{ax}=80 \text{ w}$
Taux de tolérance	$\pm 5\%$
Courant maximal	$I_{mp} = 4,568 \text{ A}$
Tension maximale	$V_{mp}=17,6 \text{ V}$
Courant de court-circuit	$I_{sc} = 5,12$
Tension de circuit ouvert	$V_{oc}=21\text{V}$
Dimension	880x673x35 mm
Système à connecter à ce Module	12 V
Poids de module	8 kg

### 3.3.3. Anémomètre à hélice Testo410-1

Cet appareil a deux (2) fonctions : mesurer la température et mesurer la vitesse du vent. Il convient parfaitement pour des mesures de contrôle rapide. L'anémomètre est doté d'une hélice intégrée d'un rayon de 20 mm et d'un capuchon de protection enfichable. Cet appareil est muni d'un écran éclairé pour consulter les valeurs de mesure dans des endroits sombres.



**Figure 3-5 et 6:** Photos Anémomètre à hélice Testo410-1 de Labo de l'UDDM

### 3.3.3.1. Vitesse d'air

Pour la mesure de vitesse de vent, l'appareil présente les caractéristiques ci-dessous :

**Tableau 3-3:** Caractéristiques technique pour la mesure de la vitesse de l'air

Plages de mesure	0,4 à 20 m/s
Résolution	0,1 m/s
Précision appareil	$\pm(0,2 \text{ m/s} + 2\% \text{ vm})$

### 3.3.3.2. Température

Les caractéristiques suivantes sont pour la mesure de température

**Tableau 3-4:** Caractéristiques technique pour la mesure de la température de l'air

Plages de mesure	-10 à 50°C
Résolution	0,1°C
précision appareil	+/- 0,5°C
Cadence de Mesure	0,5 s

### 3.3.3.3. Données techniques

Ce tableau donne le récapitulatif de l'ensemble des données techniques de l'appareil ainsi que celui de pile utilisé pour son alimentation.

**Tableau 3-5:** Données techniques

Dimensions	133x46x25mm (inclut capot protection)
Température	-10 à +50°C
Indice de protection	IP 10
Type de pile	2 piles Micro AAA
Autonomie	100h (Moyenne sans Rétro-éclairage)
Température de stockage	-20 à +70°C
Poids	110g (Inclut capot de protection et pile)

### 3.3.4. Multimètre Digital DT9205A

Cet appareil a été utilisé pour mesurer la tension à circuit ouvert et le courant de court-circuit. Il est muni d'un bouton d'alimentation ON OFF avec trente (30) positions faciles à utiliser par simple commande de rotation pour Fonction et Calibre. Il présente une haute sensibilité de l'ordre de 100UV, est doté d'un indicateur automatique de sur-calibrage, d'un indicateur

automatique de polarité sur calibres DC (courent continu) et d'une protection totale des calibres. Il peut également effectuer de mesure de résistance, de capacité, de test diode avec courant fige à 1 mA mais aussi le test de transistor. Son écran est LCD et sa dimension est de 25,4 x 22,9 x 4,8 cm.



**Figure 3-7 et 8:** Photo du Multimètre utilisé dans ce cadre du travail

### 3.3.5. Récapitulatif de l'ensemble de matériels utilisés

Ce tableau 3-6 résume de manière brève l'ensemble des matériels utilisés dans ce cadre de recueil de données :

**Tableau 3-6:** Récapitulatif de l'ensemble de matériels utilisés

Matériels	Désignation	Utilité
Pyranomètre PCE-SPM1	Solar power Meter Serial No :140907708	Capture de rayonnement solaire global et diffus
Multimètre	Digital Multimeter DT9205A	Affichage numérique de valeurs de tension et de courant selon le besoins
Rapporteur	Type classique gradué de 0 à 90 <sup>0</sup> dans les deux sens	Mesure de angle inclinaison de Modules
Module photovoltaïque	Model : SA-80 serial No :160905289841776	Production de l'électricité : tension et courant mesurable
Supports Métalliques des Modules	Supports métalliques pivotants pour adapter aux différentes positions et angles	Maintiennent les Modules hauteur et dans l'orientation et inclinaison désirées
Testo410-1	401-1 : ANEMOMETER+TEMP 1471402 BAYQ239712	Mesures de température et de vitesse de vent
Support métallique de pyranomètre	Support métallique de accompagnant le dispositif	Maintient le pyranomètre dans l'orientation et inclinaison voulues

### 3.4. Méthodes

La méthode d'acquisition de données consiste à placer les modules sous le soleil et de relever les grandeurs électriques tels que la tension à circuit ouvert  $V_{oc}$  et le courant de court-circuit  $I_{sc}$  du module. Il est aussi important de noter que le pyranomètre ainsi que l'anémomètre Testo410-1 sont aussi utilisés dans le but de relever le rayonnement solaire, la température du module et la vitesse de vent. Nous faisons varier l'angle d'inclinaison du plan des modules. De ce fait, les angles de 90, 60, 30 et 15° par rapport à la verticale sont retenus dans le cadre de notre étude sur le site de l'UDDM.



**Figure 3-9:** Position d'Angle  $90^\circ$  ;



**Figure 3-10:** Position d'Angle  $60^\circ$



**Figure 3-11:** Position d'Angle  $30^\circ$  ;



**Figure 3-12:** Position d'Angle  $15^\circ$

### **3.5. Conclusion partielle**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents appareils et la méthode ayant conduit à l'acquisition des données à l'UDDM. L'utilisation de ces appareils ci-dessus cités et décrits, nous a permis d'effectuer des mesures des grandeurs physiques qui feront l'objet d'analyses et de discussions dans le prochain chapitre.

---

## CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

---

#### **4.1. Introduction**

L'optimisation de l'énergie solaire photovoltaïque est l'un de paramètre important pour une bonne installation PV. Le degré de capture de rayonnement solaire par un Module varie en fonction d'angle d'incidence de rayons solaires.

Ainsi pour optimiser la production d'une installation photovoltaïque, il convient d'orienter le module de façon optimale afin de capter le maximum de rayonnement solaire.

Dans ce chapitre nous analysons et interprétons les résultats obtenus par rapport aux différents angles d'inclinaisons donnés au Module PV.

#### **4.2. Présentations des résultats**

A travers ces les tableaux 4-1 et 4-2 nous constatons que la valeur de rayonnement solaire est croissante de 7h à 10h, elle varie faiblement entre 10h et 15h et elle est en chute à partir de 15h. Mais aucune de ces valeurs n'atteignent mille ( $1000\text{W/m}^2$ ) du fait de perturbation météorologique observée pendant la période du relevé du au passage du nuage, à la poussière ou à la brume.

Les données ont été collectées manuellement au nouveau site de l'UDDM en face de Laboratoire de physique en utilisant des appareils appropriés, puis saisies dans un logiciel classeur : EXCEL afin de faire sortir un tableau récapitulatif de l'ensemble des données issu de chacun module.

**Tableau 4-1:** Récapitulatif des données recueillies sur le Module SA-80 position variable au site de l'UDDM

	7H	9H	10H	12H	15H	16H	17H:30	Moyen/Jour
Température	16,80	25,84	29,41	36,46	38,48	35,53	26,25	29,82
Courant-15	0,33	3,38	3,83	4,15	3,66	2,90	0,63	2,70
Courant-30	1,50	3,31	3,88	4,21	3,68	2,81	0,57	2,85
Courant-60	0,36	2,48	3,25	3,92	2,93	2,04	0,33	2,19
Courant-90	0,22	1,81	2,57	3,45	2,30	1,45	0,20	1,71
Tension-15	20,72	22,65	22,52	21,94	21,73	21,81	20,32	21,67
Tension-30	21,03	22,45	22,28	21,80	21,58	21,63	20,30	21,58
Tension-60	20,70	22,15	22,06	21,72	21,43	21,35	19,81	21,32
Tension-90	20,13	21,80	21,91	21,61	21,19	20,96	19,16	20,96
Puissance-15	6,77	76,43	86,23	91,00	79,54	63,28	12,88	59,45
Puissance-30	31,64	74,21	86,40	91,80	79,35	60,76	11,63	62,25
Puissance-60	7,39	54,97	71,70	85,19	62,82	43,53	6,57	47,45
Puissance-90	4,38	39,42	56,31	74,46	48,78	30,33	3,79	36,78
Rayonnement	172,10	832,34	936,02	984,21	895,07	723,48	179,57	674,68

**Tableau 4-2** Récapitulatif de données recueillies sur le Module SA-80 avec position fixe

	7H	9H	10H	12H	15H	16H	17H:30	Moyen /Jour
Température	16,80	25,84	29,41	36,46	38,48	35,53	26,25	29,82
Courant-15	0,27	2,47	3,20	3,97	2,75	1,71	0,25	2,09
Courant-30	0,25	2,42	3,19	4,01	2,73	1,74	0,22	2,08
Courant-60	0,22	2,19	2,92	3,76	2,54	2,14	0,20	1,99
Courant-90	0,18	1,68	2,45	3,26	2,17	1,26	0,16	1,60
Tension-15	20,91	22,68	22,55	22,20	21,85	21,77	19,78	21,67
Tension-30	20,90	22,54	22,54	22,19	21,84	21,71	19,81	21,65
Tension-60	20,70	22,52	22,44	22,08	21,76	21,53	19,66	21,53
Tension-90	20,37	22,28	22,25	21,95	21,59	21,31	19,41	21,31
Puissance-15	5,71	55,97	72,18	88,21	60,18	37,32	4,87	46,35
Puissance-30	5,15	54,60	71,93	89,00	59,60	37,70	4,44	46,06
Puissance-60	4,54	49,39	65,47	83,03	55,23	46,09	3,84	43,94
Puissance-90	3,63	37,49	54,57	71,57	46,92	26,87	3,12	34,88

### 4.3. Influence de Rayonnement sur les paramètres caractéristiques selon les différents angles d'inclinaisons

Pour mieux visualiser, nous avons fait des graphiques en utilisant l'environnement Matlab. Plusieurs figures ont été réalisées et feront l'objet d'analyse et interprétations.

#### 4.3.1. Cas de Module SA-80 avec position variable

##### 4.3.1.1. Graphique courant-rayonnement

Les figures 4-2 à 4-6 présentent les graphiques des caractéristiques de la production de courant selon le rayonnement et les différents angles d'inclinaisons. A chaque fois que les mesures seront effectuées, ce module SA-80 avec position variable sera orienté à la direction du soleil. Pour l'ensemble de ces graphiques, le courant délivré par le module PV suit l'évolution de l'éclairement. Donc le courant produit est proportionnel à la quantité de l'éclairement reçu à la surface du module.

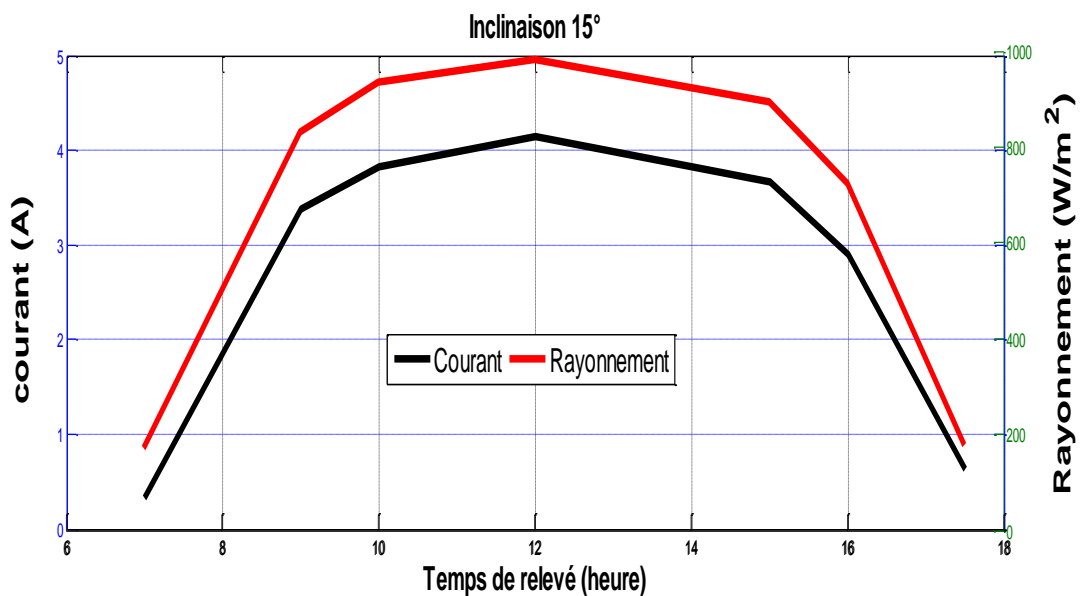


Figure 4-1: Caractéristique du courant selon le rayonnement à l'UDDM

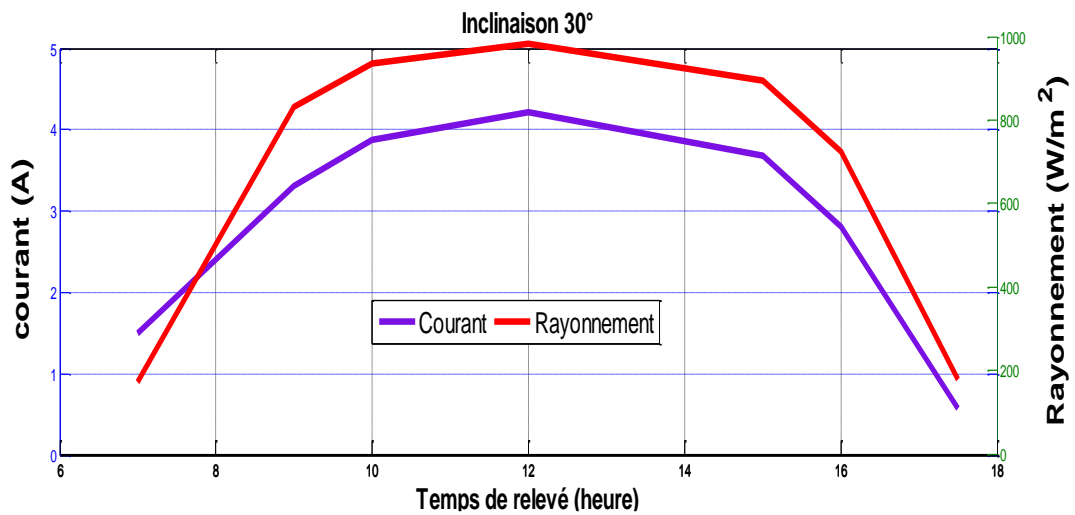


Figure 4-2: Caractéristique du courant selon le rayonnement à l'UDDM

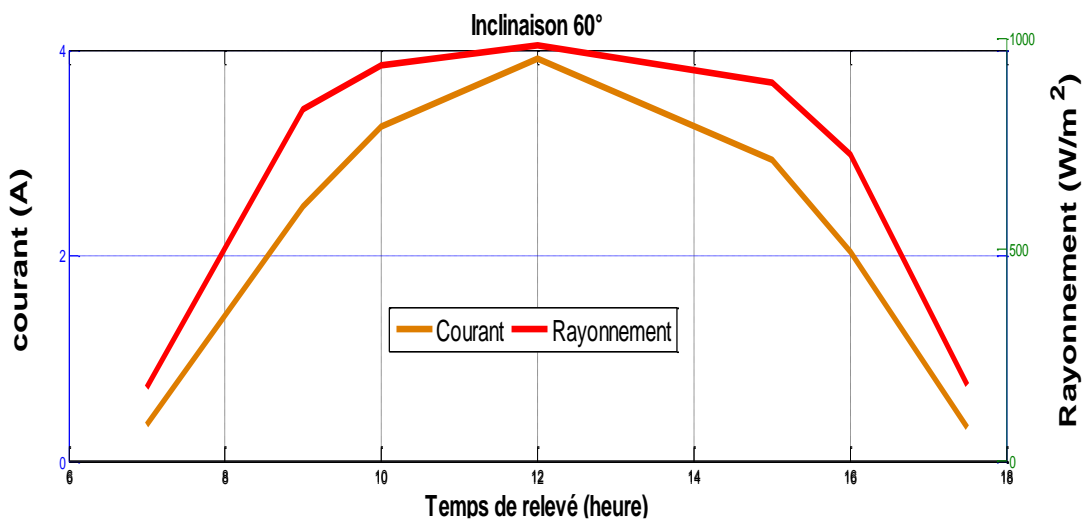


Figure 4-3: Caractéristique du courant selon le rayonnement à l'UDDM

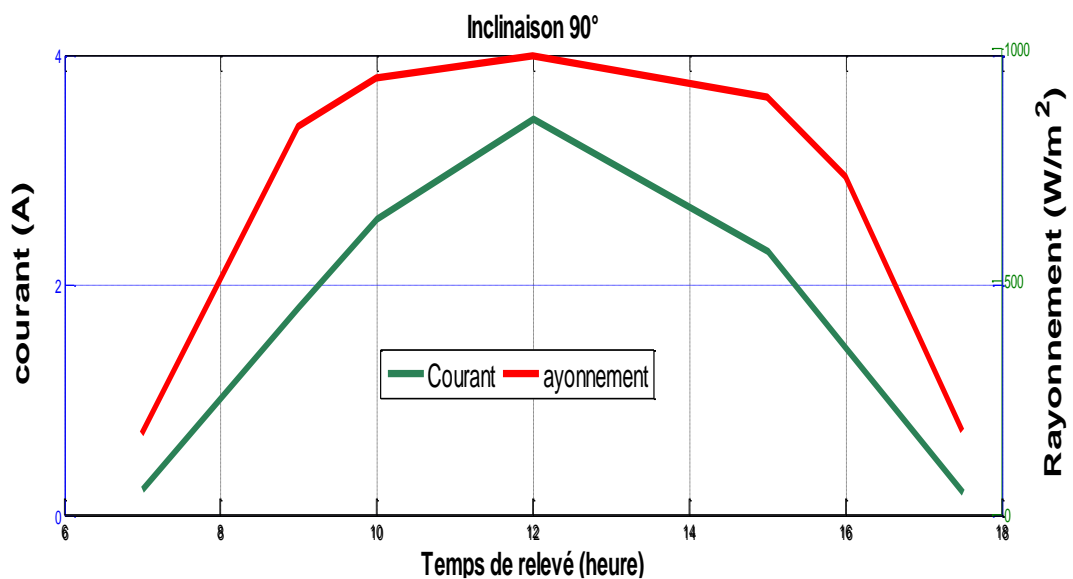
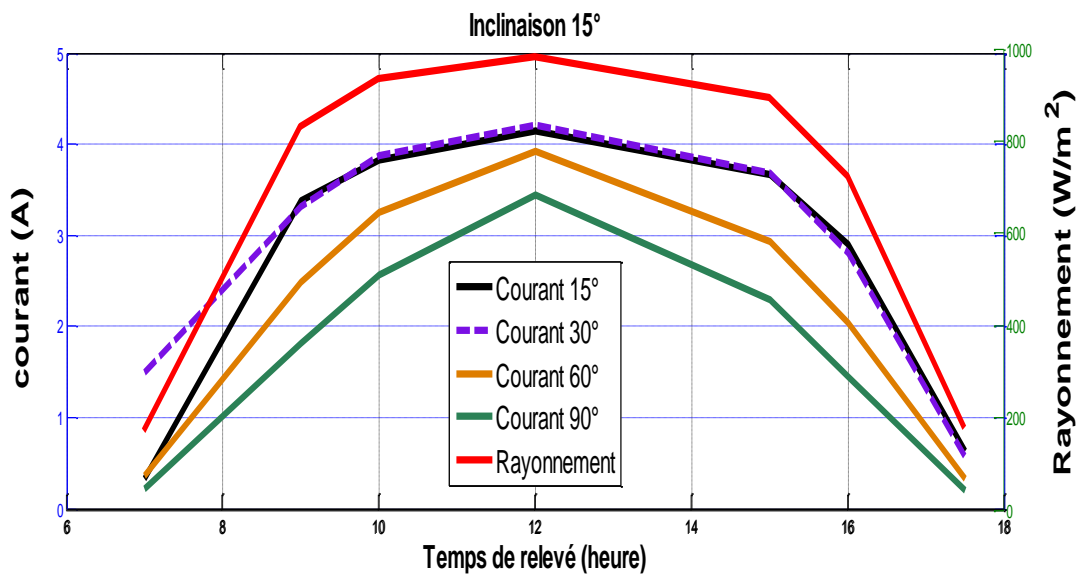


Figure 4-4: Caractéristique du courant selon le rayonnement à l'UDDM



**Figure 4-5:** Courbes combinées des courants selon le rayonnement à l'UDDM

Pour l'ensemble des Figures (4-2, 3, 4 et 5), on constate que le courant produit à la même allure que le rayonnement, c'est-à-dire une augmentation du rayonnement entraîne une augmentation du courant produit et une baisse du rayonnement a le même effet sur le courant délivré. Cela est déjà confirmé par étude menée au chapitre2 figure 2-5.

Mais une observation de la figure 4-6 nous montre une variation de différents courants produits. La figure 4-6 est une combinaison de quatre (4) courants issus de quatre différents angles d'inclinaison. Pour la même durée de mesure, on constate que les graphiques correspondant à l'inclinaison de 90 et 60° sont plus bas, ce qui caractérise une faible production de courant. Les deux graphiques qui correspondent à l'inclinaison de 30 et 15° sont plus hauts caractérisent ainsi une production plus importante de courant de court-circuit. Donc ces deux angles d'inclinaison permettent de capter plus de rayonnement par rapport aux deux autres précédents.

Les coefficients de corrélation ainsi calculés qui sont de l'ordre de 0,97 ; 0,99 ; 0,97 et 0,94 respectivement pour les inclinaisons de 15, 30, 60 et 90° montrent qu'il existe une forte relation entre le courant et le rayonnement. Le coefficient de corrélation entre le rayonnement et le courant d'angle d'inclinaison de 30° atteint un seuil de 0,99 prouvant ainsi avoir une bonne orientation de surface de panneau par rapport à l'arrivée de rayonnement solaire.

#### 4.3.1.2. Graphiques tension-rayonnement

Les figures 4-7 à 4-11 présentent les graphiques des caractéristiques des différentes tensions délivrées selon le rayonnement et les différents angles d'inclinaisons.

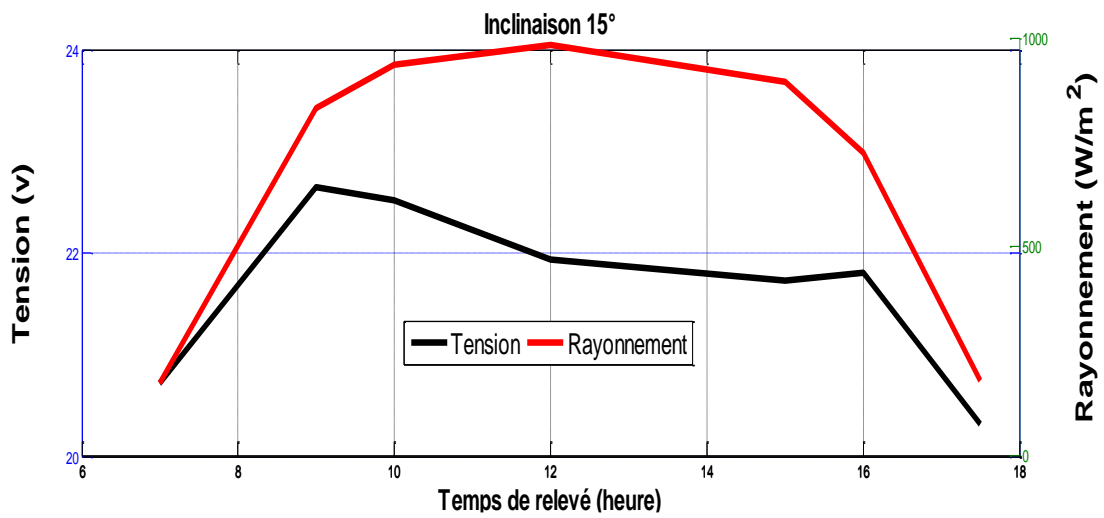


Figure 4-6: Influence de Rayonnement sur la Tension avec angle de 15° à l'UDDM

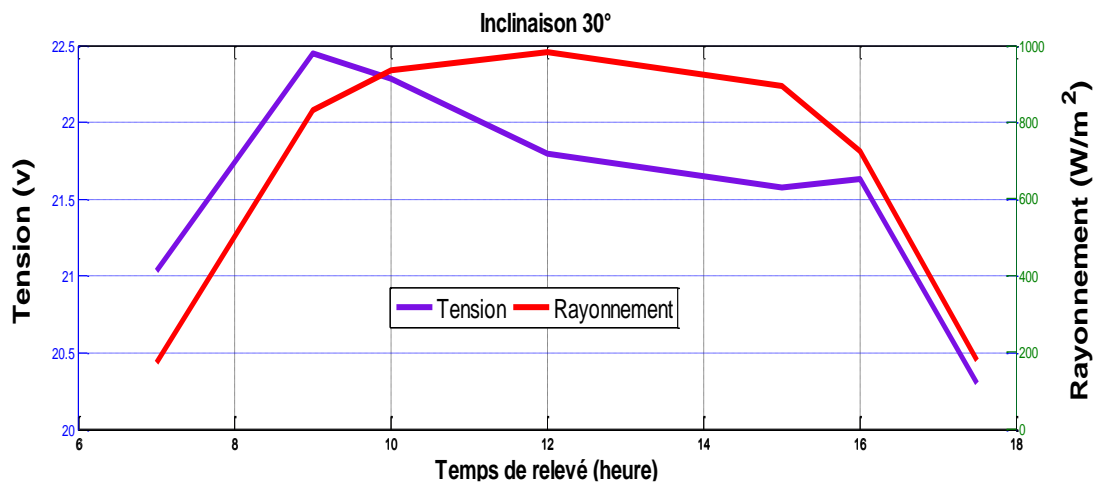


Figure 4-7: Influence de Rayonnement sur la Tension avec angle 30° à l'UDDM

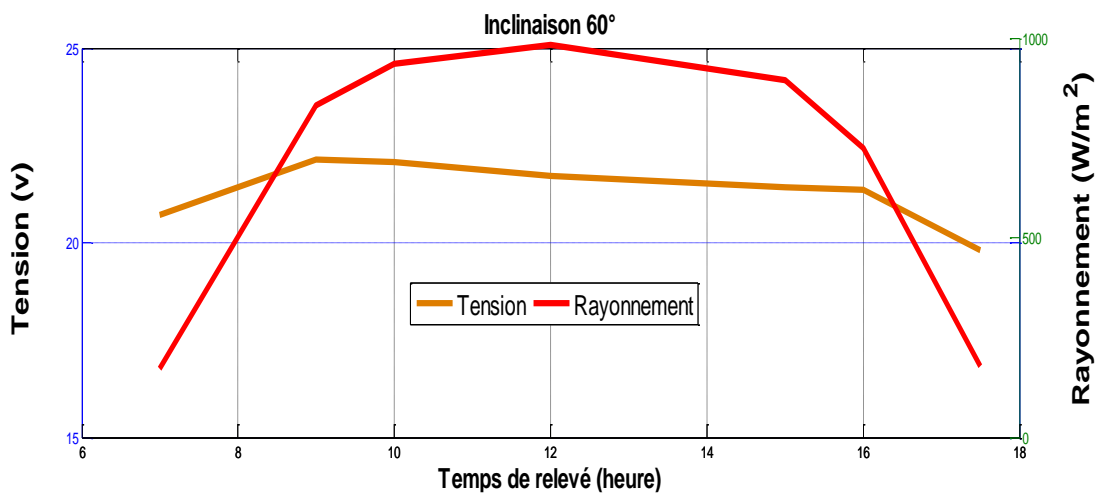
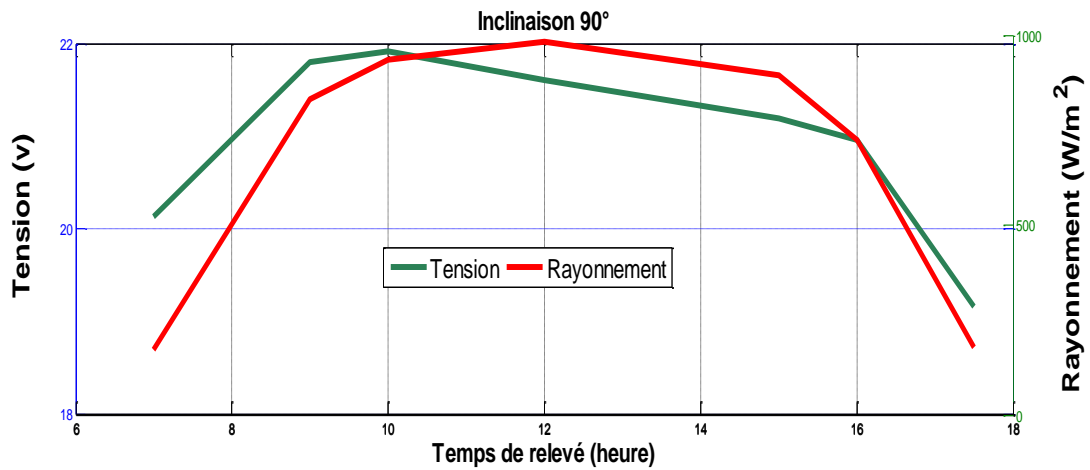
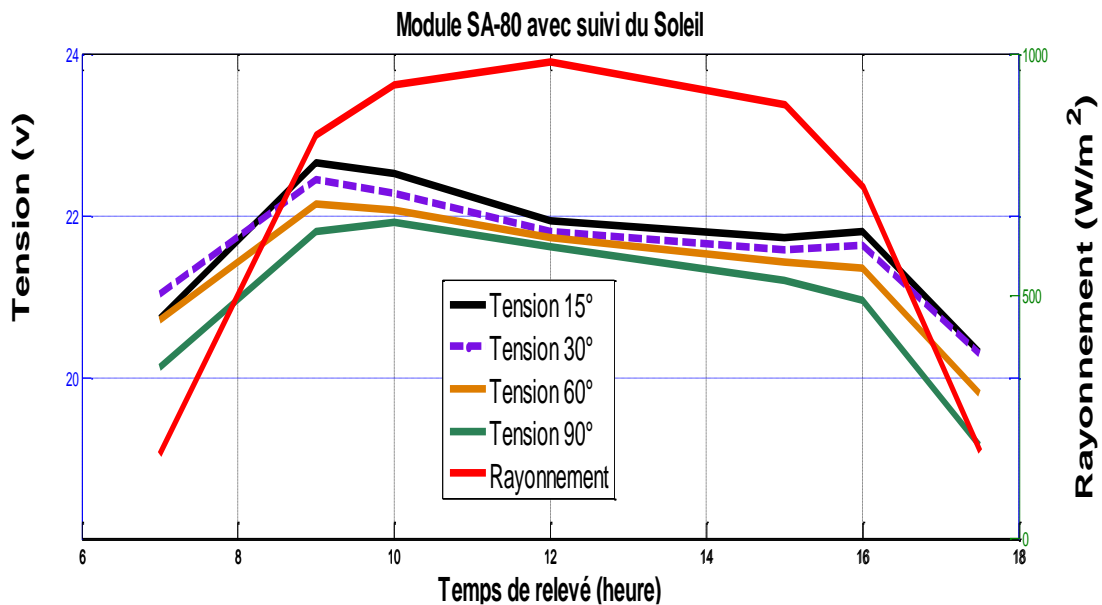


Figure 4-8: Influence de Rayonnement sur la Tension avec angle 60° à l'UDDM



**Figure 4-9:** Influence de Rayonnement sur la Tension avec angle 90° à l'UDDM



**Figure 4-10:** Influence de rayonnement sur la Tension à l'UDDM

En observant ces figures ci-dessus on remarque qu'à certains points le rayonnement atteint une valeur importante mais la tension semble décroître. Alors que le seuil de rayonnement est atteint à midi, on constate que la valeur de la tension est plus importante entre 9h et 10h. Ceci caractérise que la variation de la tension ne dépend pas systématiquement de quantité du rayonnement reçu par le module, quoique qu'il a besoin d'être éclairé par le soleil pour créer une différence de potentiel.

La Figure 2-5 du chapitre 2 confirme également cela. Bien que le rayonnement influe légèrement sur la tension, l'analyse de Figure 4-11 nous donne une nette différence entre les différentes tensions issues de différents d'angle d'inclinaison. Ainsi on constate que la

tension-15 est supérieure aux autres tensions, cela s'explique par le fait que l'angle d'inclinaison de 15° permet au module de recevoir au mieux possible l'éclairage solaire.

#### 4.3.1.3. Graphiques Rayonnement-Puissance

Une puissance issue du Module solaire photovoltaïque est constituée par le produit du courant et de la tension. De ce fait, les Figures 4-12 à 4-16 présentent les différentes puissances selon les différents angles d'inclinaisons.

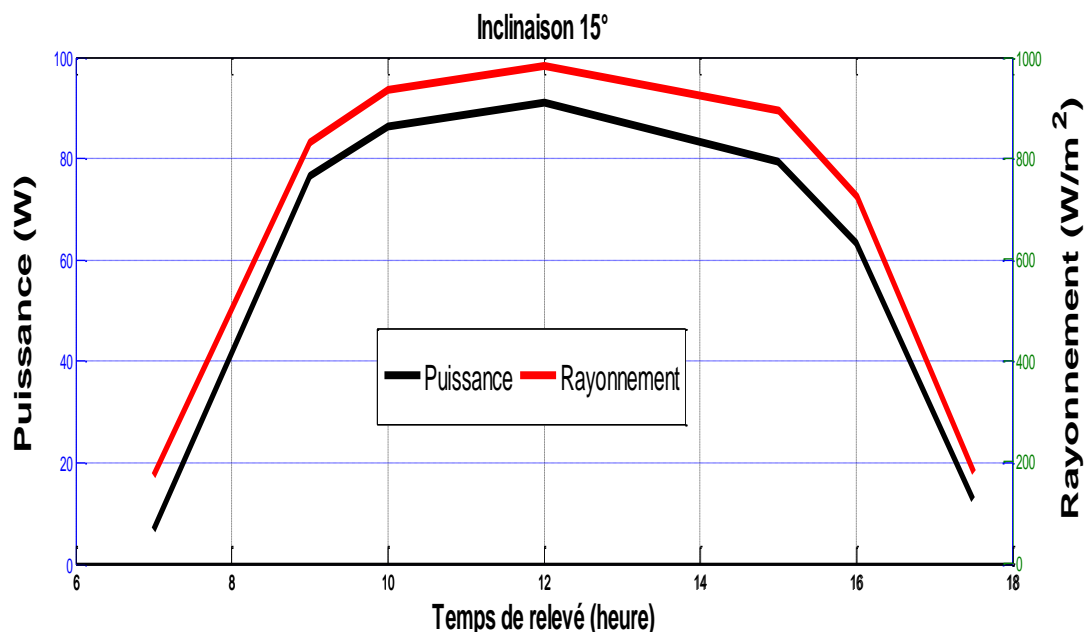


Figure 4-11: Evolution de la puissance produite selon le rayonnement à 15° à l'UDDM

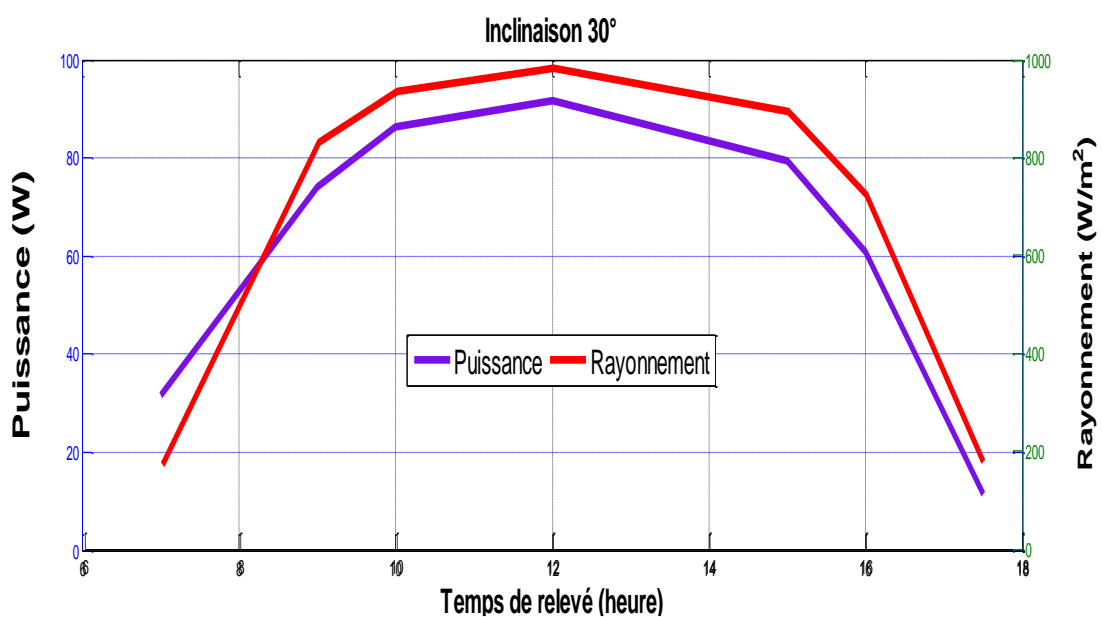


Figure 4-12: Evolution de la puissance produite selon le rayonnement à 30° à l'UDDM

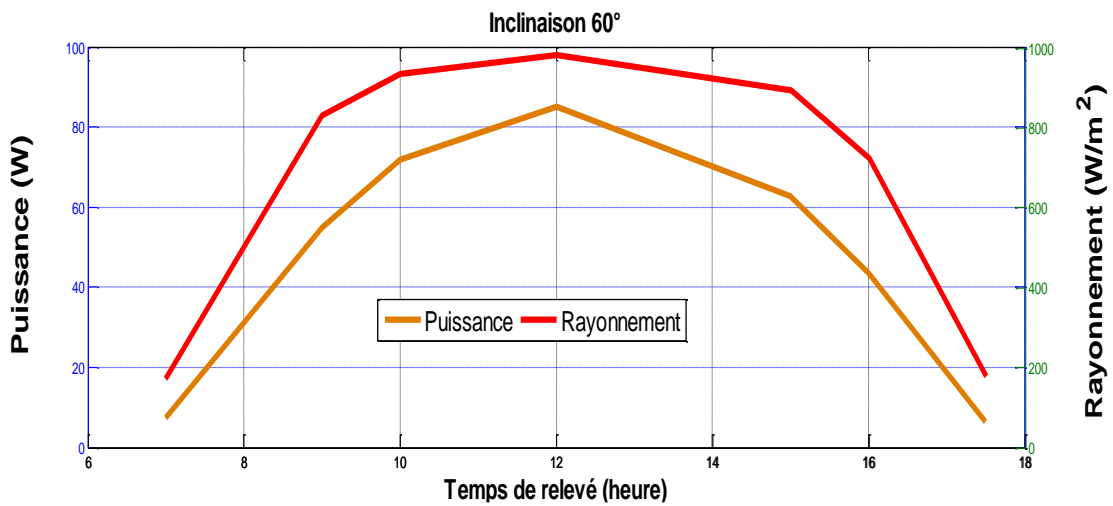


Figure 4-13: Evolution de la puissance produite selon le rayonnement a 60° à l'UDDM

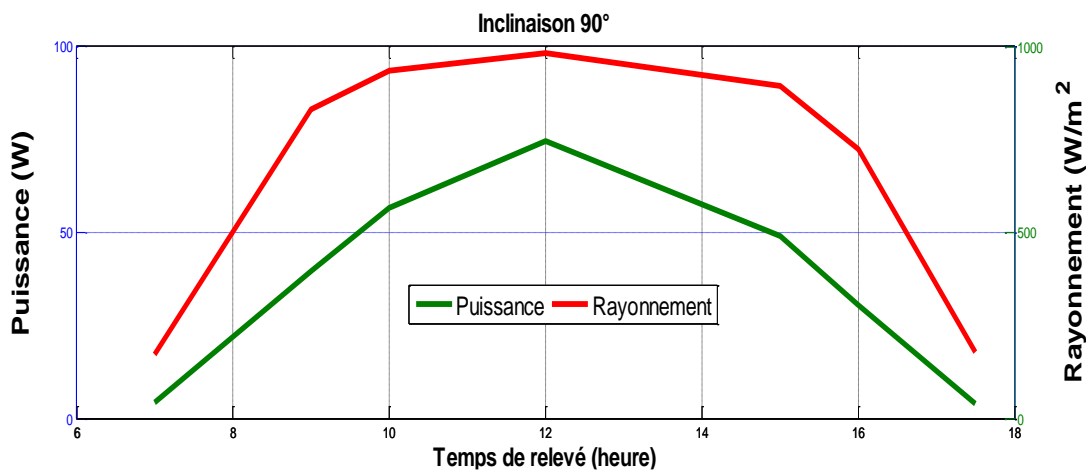


Figure 4-14: Evolution de la puissance produite selon le rayonnement a 90° à l'UDDM

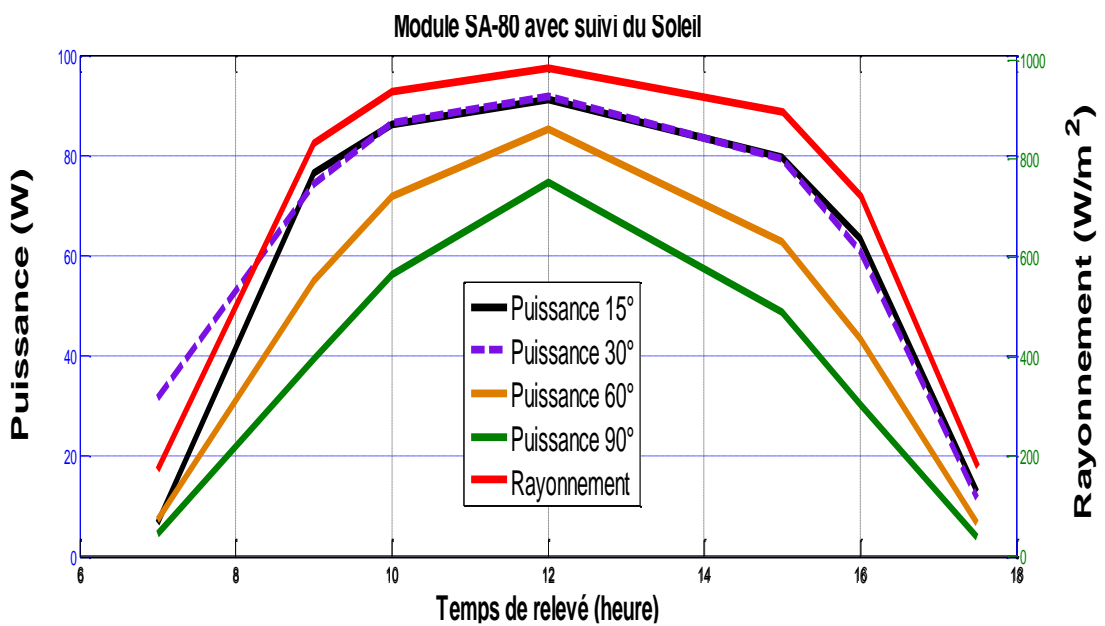


Figure 4-15: Evolution de la puissance produite selon le rayonnement à l'UDDM

L'analyse des caractéristiques du courant et de tension selon les différents d'angles d'inclinaison donne une idée sur l'évolution de la production de l'énergie par le module PV. La puissance produite étant proportionnelle au produit du courant et de tension, on peut donc dire que les inclinaisons de 15 et 30° produisent plus de l'énergie que celles de 60 et 90° et cela se constate facilement sur les figures d'évolution de puissance-rayonnement.

Pour mieux comprendre ces différentes caractéristiques, des graphiques puissance-rayonnement ont été réalisés. Ainsi on constate que la production d'énergie dépend de la quantité de rayonnement reçu à la surface du module. Les différentes figures (4-12, 13, 14 et 15) réalisées à cet effet montrent que l'ensemble de courbes de puissances ont la même allure que celles du rayonnement vérifiant ainsi que le lien de proportionnalité du rayonnement reçu et de puissance fournie.

Sur la Figure 4-16 on constate que l'angle d'inclinaison de 15 et 30° produit plus de puissance attestant une meilleure orientation par rapport aux rayons du soleil. Pour produire un maximum d'électricité, un module photovoltaïque doit être incliné de façon perpendiculaire aux rayons du soleil. Ceci est très généralement difficile à obtenir car la position de soleil varie en fonction de l'heure de la journée mais aussi des saisons. L'orientation optimale de l'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques s'avère la méthode idéale pour optimiser la production d'un générateur photovoltaïque [19].

#### **4.3.2. Cas de Module SA-80 avec position fixe**

Ce module du même type et de même puissance que le précédent à une position fixe plein sud mais orienté des mêmes angles d'inclinaison qui sont de 15, 30, 60 et 90°. Pour les installations de petite puissance telle qu'à l'usage domestique, il est préférable que la module soit fixe, mais un meilleur angle d'inclinaison demeure nécessaire.

##### **4.3.2.1. Graphique courant-rayonnement**

Les figures 4-17 à 4-21 présentent les influences de rayonnement sur le courant produit par le module selon les différents angles d'inclinaison.

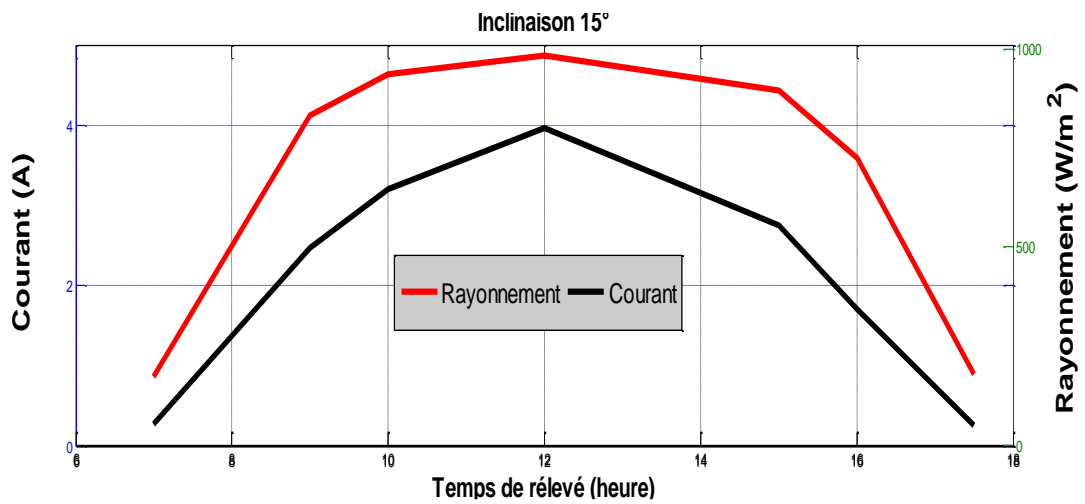


Figure 4-16: Caractéristique du courant selon le rayonnement à l'UDDM

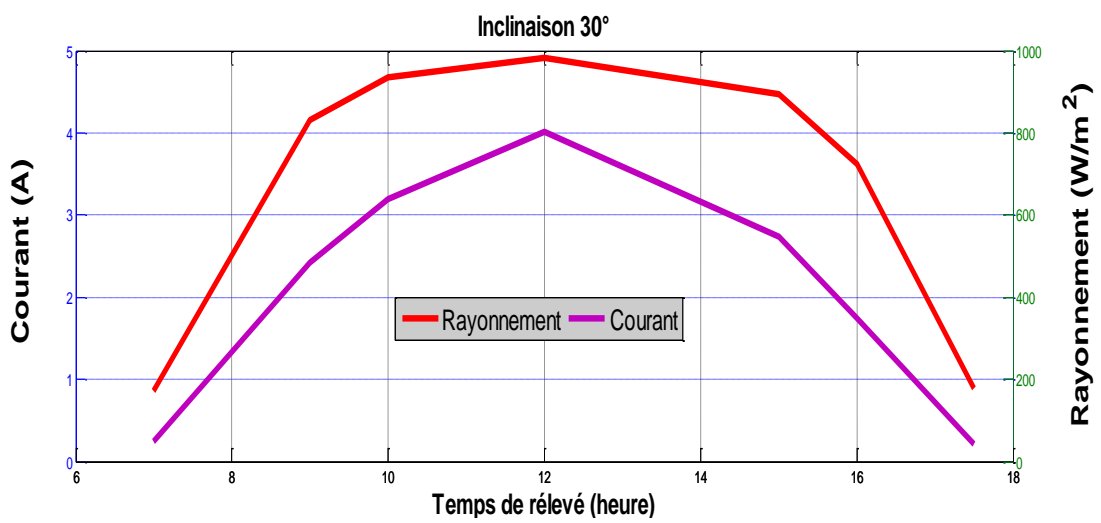


Figure 4-17: Caractéristique du courant selon le rayonnement à l'UDDM

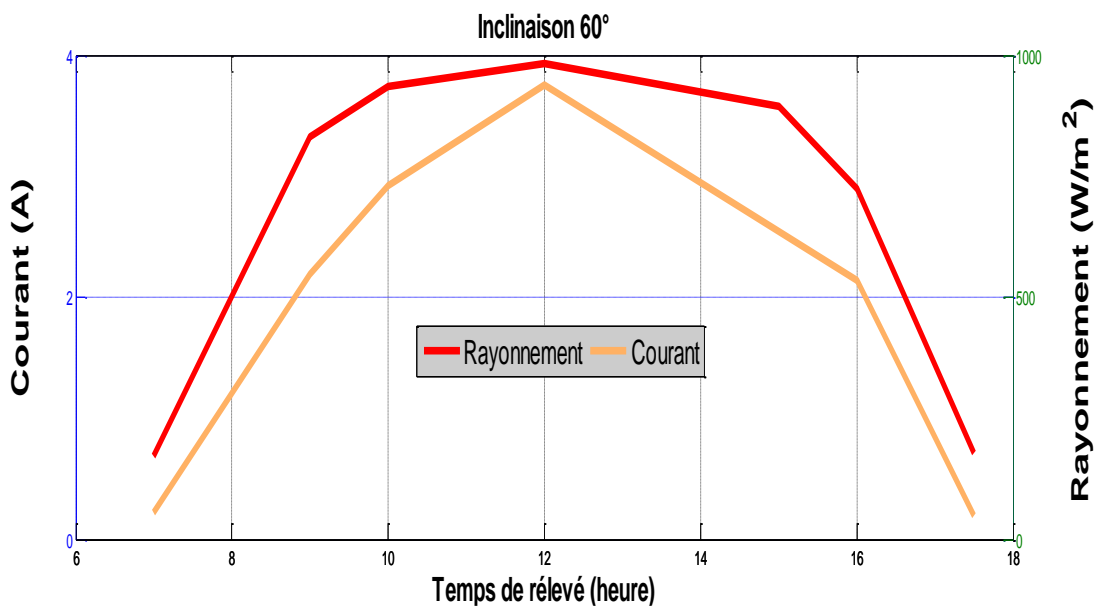
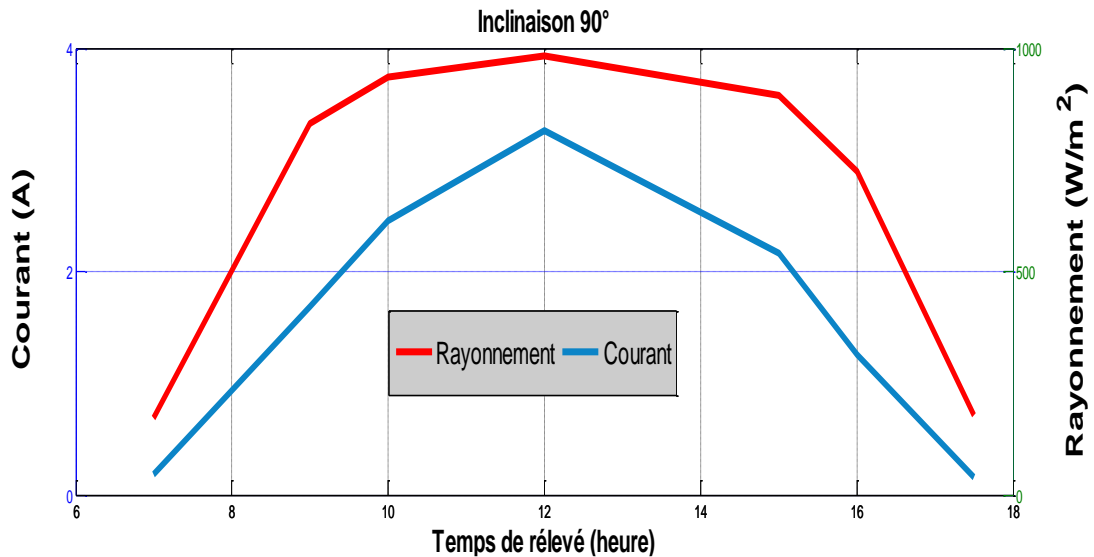
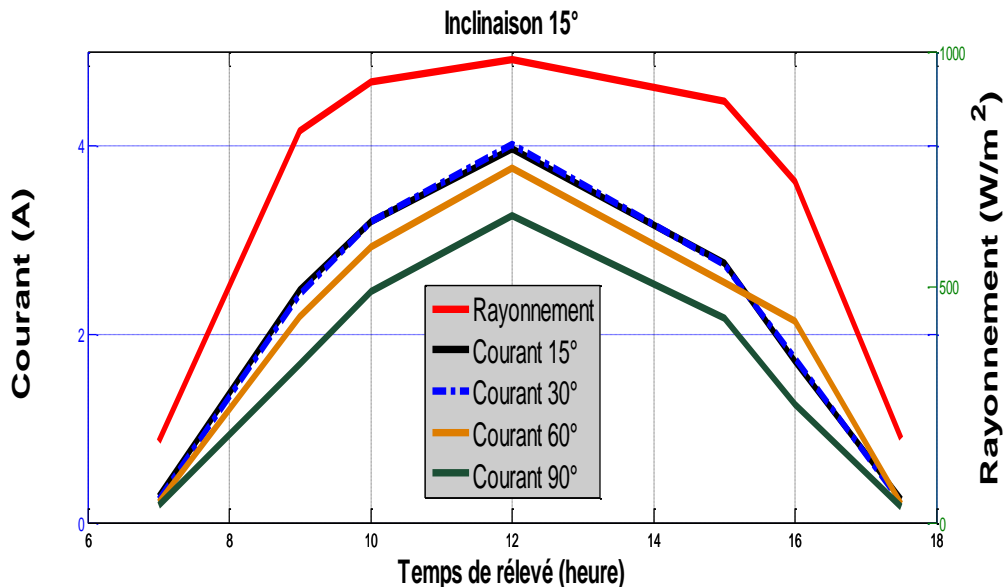


Figure 4-18: Caractéristique du courant selon le rayonnement à l'UDDM



**Figure 4-19:** Caractéristique du courant selon le rayonnement à l'UDDM



**Figure 4-20:** Caractéristique du courant selon le rayonnement à l'UDDM

Pour ces Figures ci-dessus (4-17, 18, 19 et 20), on constate que plus le rayonnement augmente plus la production du courant augmente aussi, une diminution du rayonnement s'accompagne par une diminution du courant généré. C'est-à-dire que le courant produit par le module PV suit l'évolution du rayonnement. Cela est aussi confirmé par étude menée au chapitre 2; figure 2-5.

Mais une observation de Figure 4-21 nous montre une variation de différents courants produits, elle est une combinaison de quatre (4) graphiques de courants issus de quatre différents angles d'inclinaisons. On constate que les graphiques correspondants à l'inclinaison de 90 et 60° sont en dessous, ce qui caractérise relativement une faible production de courant.

Les graphiques de courant de 15 et de 30° sont confondus sur une bonne partie, mais avec une légère séparation sur la première partie, ces deux graphiques caractérisent ainsi une production plus importante de courant de court-circuit. Donc ces deux angles d'inclinaison permettent de capter plus de rayonnement par rapport aux deux autres précédents, justifiant ainsi d'une bonne orientation de surface de panneau par rapport à l'arrivée de rayonnement solaire.

#### 4.3.2.2. Graphiques tension-rayonnement

Les figures 4-22 à 4-26 donnent les caractéristiques de tensions selon l'éclairement solaire et les différents angles d'inclinaison donnés au module.

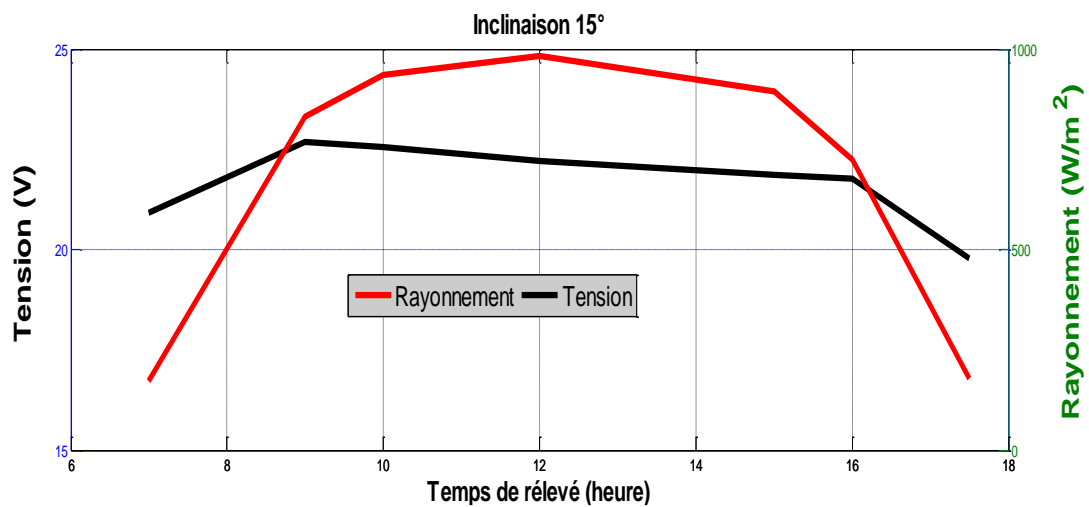


Figure 4-21: Caractéristique de tension selon le rayonnement à l'UDDM

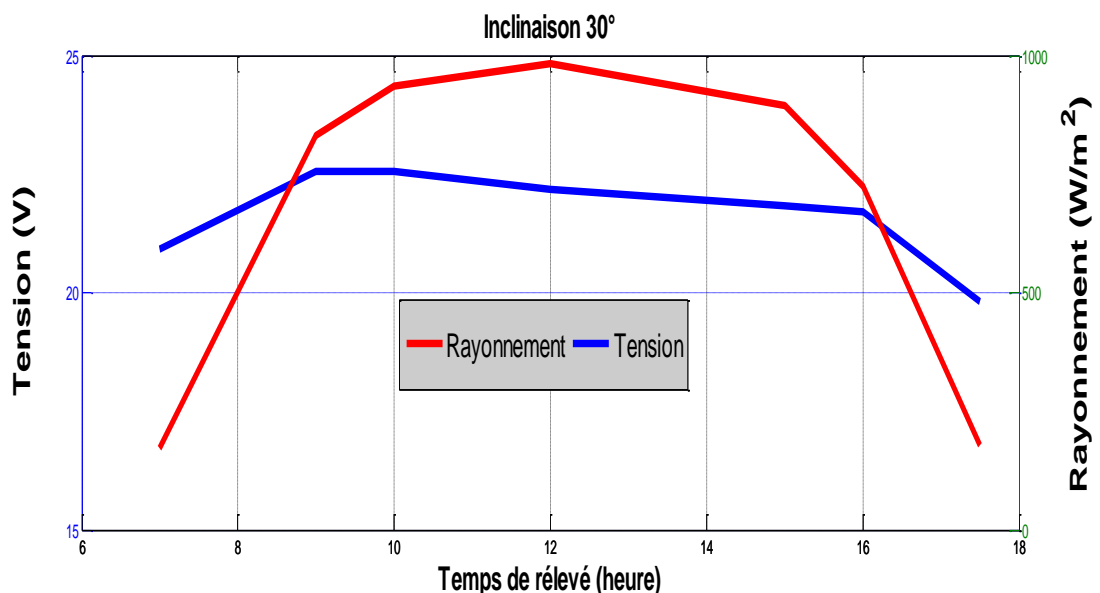
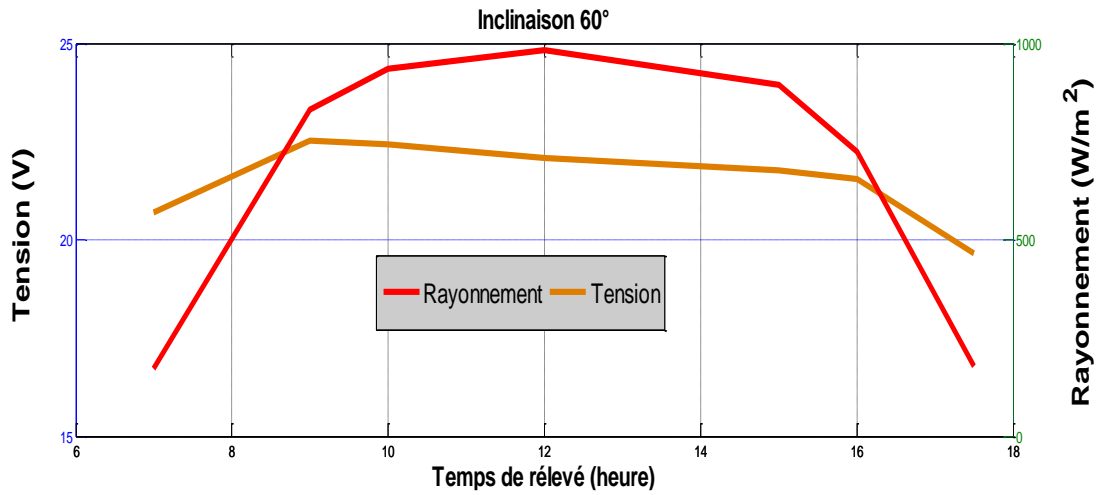
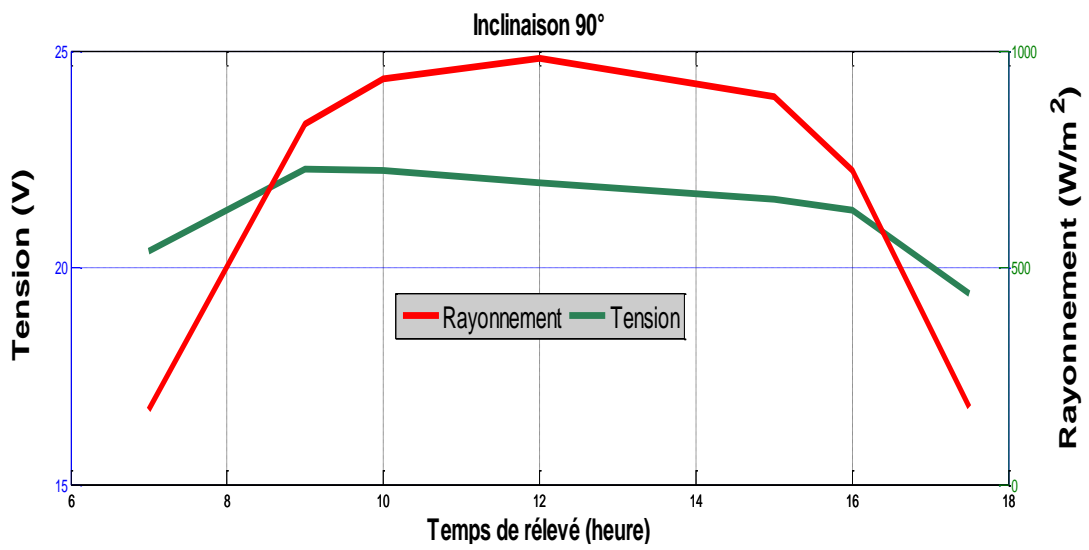


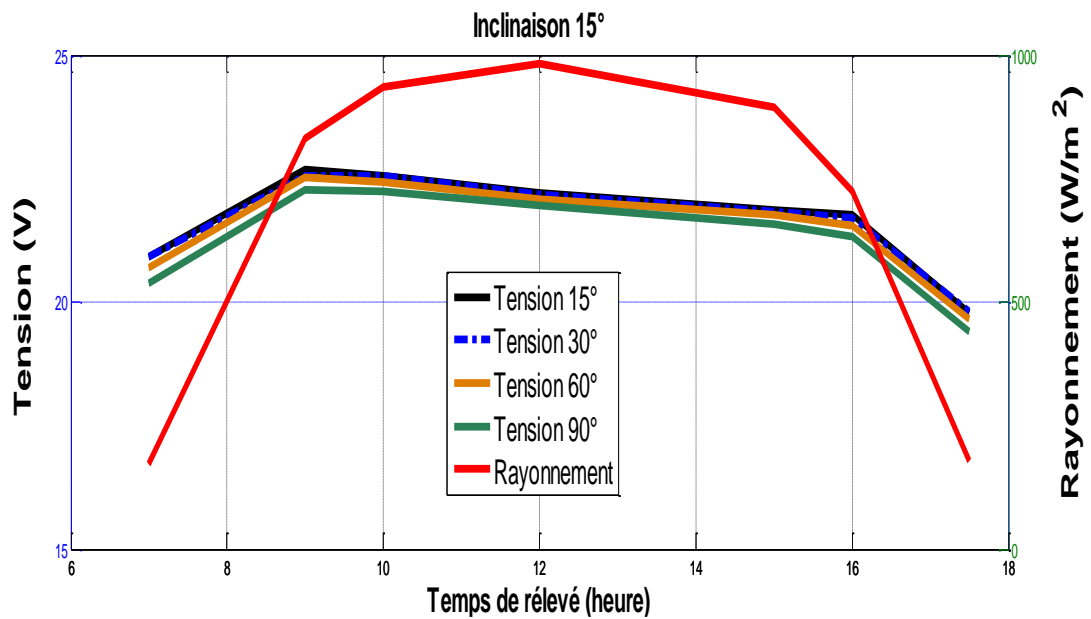
Figure 4-22: Caractéristique de tension selon le rayonnement à l'UDDM



**Figure 4-23:** Caractéristique de tension selon le rayonnement à l'UDDM



**Figure 4-24:** Caractéristique de Tension selon le rayonnement à l'UDDM



**Figure 4-25:** Influence de rayonnement sur la tension à l'UDDM

L'étude menée au chapitre 2 a clairement montré que la variation du rayonnement impacte peu sur la tension générée par un module photovoltaïque. Un regard sur les figures ci-dessus montre qu'à un certain niveau, bien que le rayonnement a augmenté de manière significative, la tension a au contraire chuté traduisant ainsi sa baisse drastique suite à l'augmentation de la température.

La figure 4-26 montre qu'il n'existe pas une grande différence entre les résultats des différentes tensions ; la tension d'inclinaison de 15° est la plus importante preuve que cette orientation est la meilleure de ces quatre (4).

### 4.3.2.3. Graphiques Puissance-Rayonnement

Les figures 4-27 à 4-31 présentent la variation de la puissance produite avec le rayonnement.

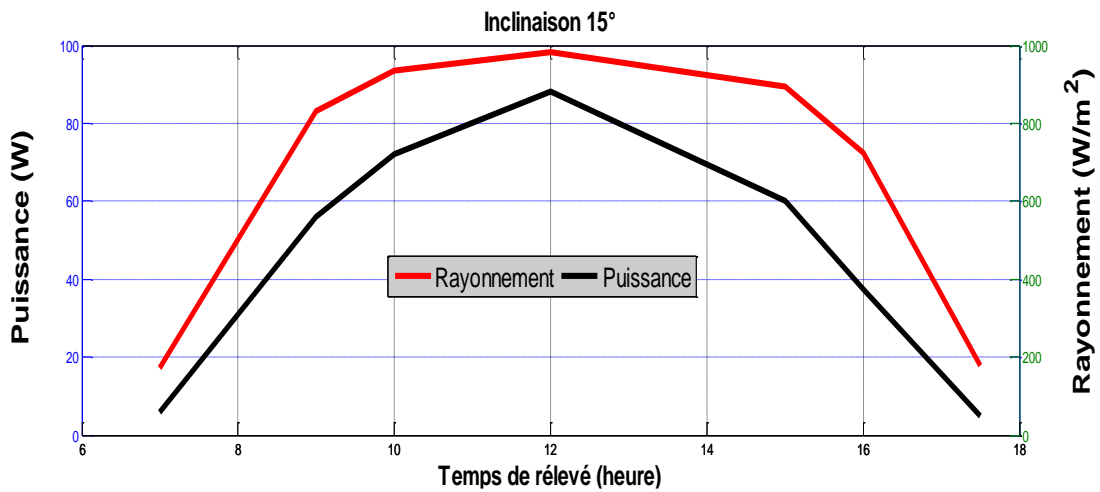


Figure 4-26: Evolution de la puissance produite selon le rayonnement à l'UDDM

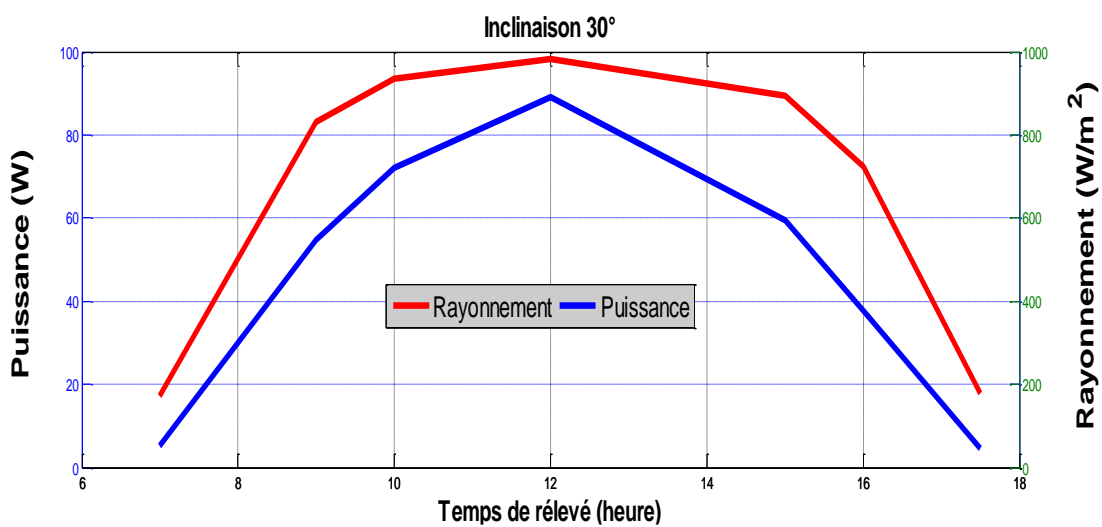
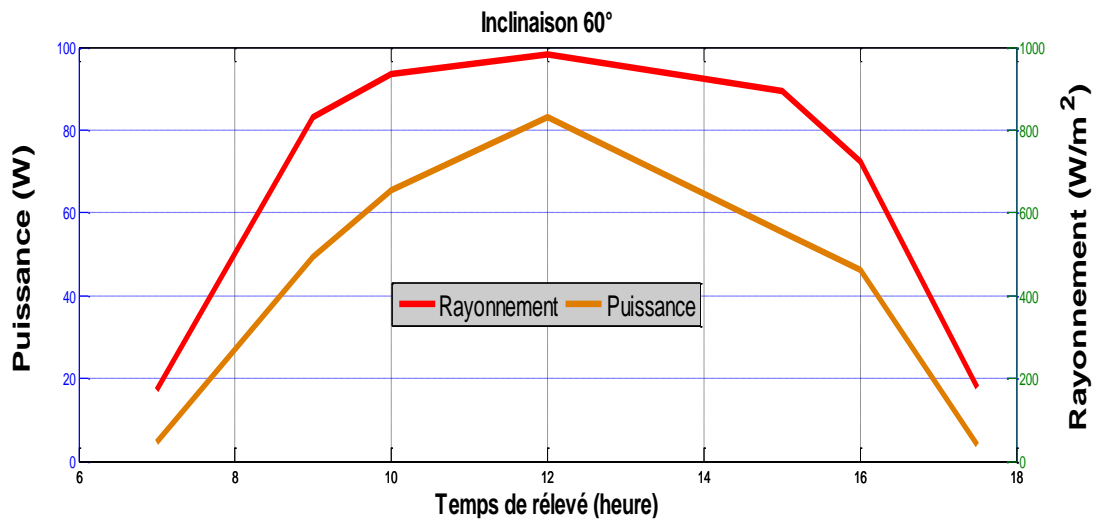
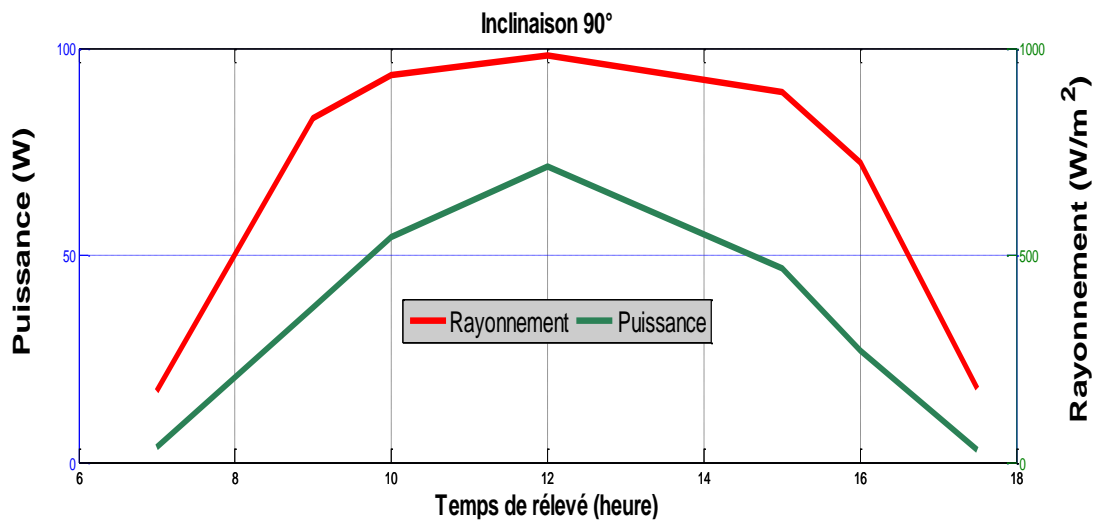


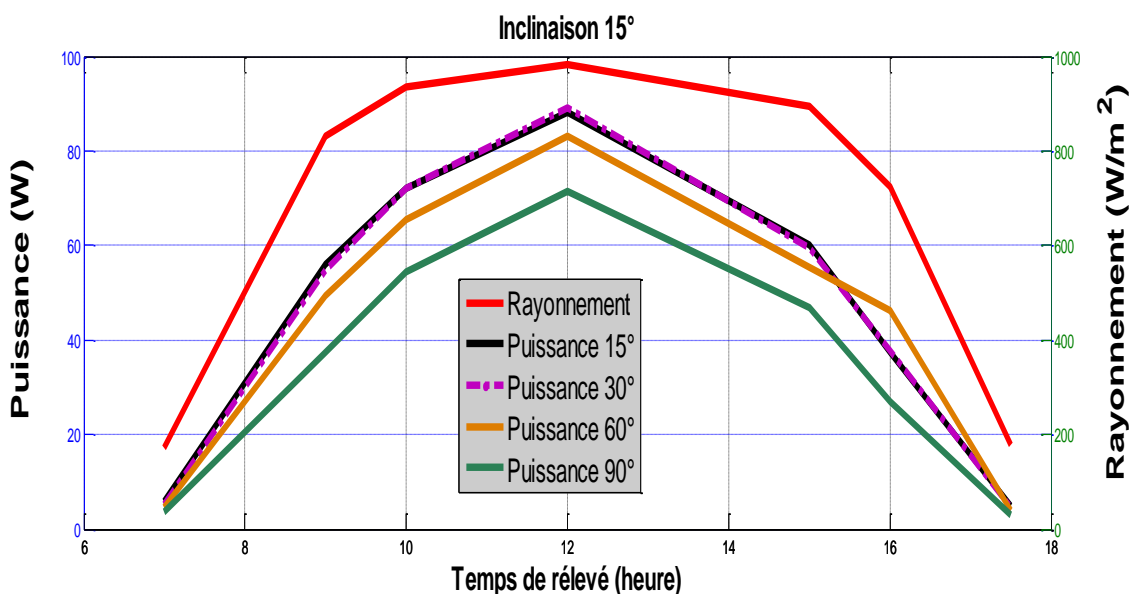
Figure 4-27: Evolution de la puissance produite selon le rayonnement à l'UDDM



**Figure 4-28:** Evolution de la puissance produite selon le rayonnement à l'UDDM



**Figure 4-29:** Evolution de la puissance produite selon le rayonnement



**Figure 4-30:** Evolution de la puissance produite selon le Rayonnement à l'UDDM

Les analyses menées sur les caractéristiques des graphiques de courant et de tension selon les différents d'angles d'inclinaison déterminent d'avance la tendance de la production de l'énergie par le module PV. La puissance produite étant proportionnelle au produit du courant et de tension, on peut donc comprendre que les inclinaisons de 15 et 30° produisent plus de l'énergie que celles de 60 et 90° et cela se constate facilement sur les figures d'évolution de puissance-rayonnement.

Pour mieux comprendre ces différentes caractéristiques, des graphiques puissance-rayonnement ont été réalisés. Ainsi on constate que la production d'énergie dépend de la quantité de rayonnement reçu à la surface du module. Ces figures ci-dessus montrent que l'ensemble de courbes de puissances ont la même allure que celles de rayonnement montrant ainsi la corrélation qui existe entre le rayonnement reçu et de puissance fournie. Sur la Figure 4-31 on constate que l'angle d'inclinaison de 15° produit légèrement plus de puissance montrant ainsi une meilleure orientation de la surface captive du module par rapport à l'éclairage solaire. Ceci confirme les analyses selon lesquelles le meilleur angle d'inclinaison pour les latitudes comprises entre 0 et 15° est de 15° [20].

#### **4.4. Conclusion partielle**

Dans ce chapitre nous avons tout d'abord présenté les résultats obtenus de relevés sur les modules photovoltaïques poly-cristallins SA-80 l'un avec suivi du soleil et l'autre avec position fixe. Ensuite, des différents graphiques ont été réalisés dans l'environnement Matlab pour observer les comportements des grandeurs qui sont le courant, la tension et la puissance selon la quantité du rayonnement solaire reçu et les différents angles d'inclinaison. Et enfin suivi de discussions sur les résultats de ces différents graphiques.

---

## **CONCLUSION GENERALE et PERSPECTIVES**

---

La consommation énergétique mondiale ne cesse d'accroître de manière exponentielle. Les sources traditionnelles de l'énergie telles que l'uranium, le pétrole, le gaz, le charbon se font de plus en plus rare en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie.

Dans ce travail, tout d'abord nous avons présenté, étudié et modélisé un module photovoltaïque. Différentes simulations sous l'environnement Matlab/Simulink sont réalisées pour mettre en évidence l'influence de variations des conditions d'éclairement et de température sur le point MPP où la puissance de fonctionnement du système est maximale.

Ensuite nous avons passé à l'acquisition des données en utilisant des matériels qui sont à notre disposition tout en usant des méthodes nous permettant de faire varier les positions et/ou angles d'inclinaison du module.

Et enfin, les données acquises ont été saisies et rendues exploitables dans le logiciel classeur Excel, incorporé dans l'espace Matlab pour réaliser des graphiques qui ont fait l'objet des discussions. Il ressort de cette étude que dans le cas de Maradi ; pour un système suivant l'évolution du soleil le meilleur d'angle d'inclinaison est de  $30^\circ$  et quant à un système fixe orienté plein sud le meilleur d'angle d'inclinaison est de  $15^\circ$ .

Comme perspectives, plusieurs travaux futurs pourraient être poursuivis à partir de nos résultats. Nous proposons particulièrement : la généralisation de l'étude de l'optimisation du rayonnement solaire reçu par un module photovoltaïque et une validation par les moyens de simulation des résultats expérimentaux obtenus.

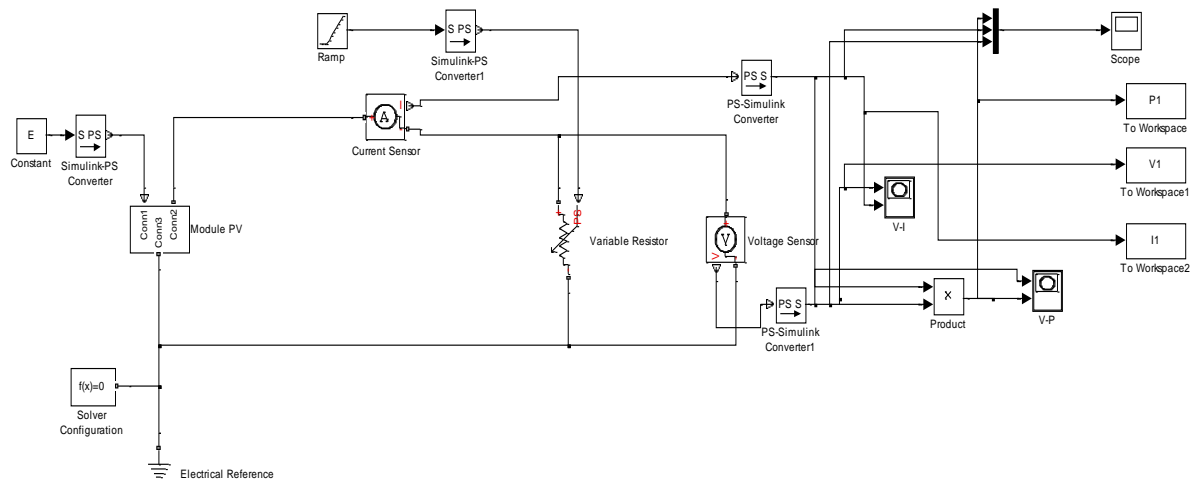
Par ce travail, nous pensons modestement avoir apporté une contribution dans l'étude d'optimisation de l'énergie solaire captée par un module photovoltaïque cas du site de l'UDDM.

## Références bibliographiques

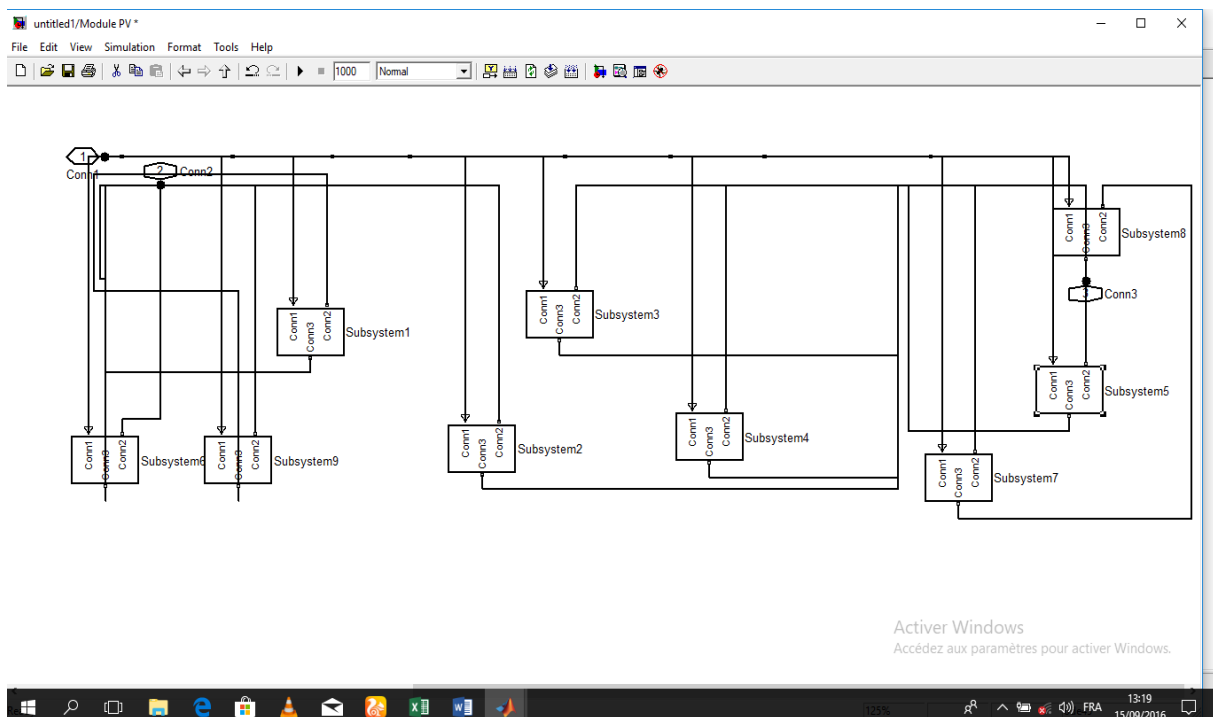
- [1] H. KAMELIA, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative en électronique de l'UMMTO (Tizi-Ouzou », Mémoire de magister Soutenu le 25/06/2012. 106 pages.
- [2] A. M SALAH, « optimisation de la production d'un générateur photovoltaïque », Mémoire de Master académique Soutenu le 09/06/2015.84 page.
- [3] A. LABOUR et M. VILLOZ, Energie solaire photovoltaïque 2<sup>e</sup> édition « [www.biblioscientifique.net](http://www.biblioscientifique.net) ». Consulté le 09 /03/2019.
- [4] « <https://fr.m.wikipedia.org> » wiki ensoleillement. Consulté le 28/01/2019.
- [5] M. DANKASSOUA, S. MADOUGOU, A. ABOUBACAR et A. FOULANI, « Etude du rayonnement solaire globale à Niamey de la période de pré-mousson et de la mousson de l'année 2013 (mai à octobre) », Revue des Energies Renouvelables Vol.20 N°1 (201 7) P131-146.
- [6] R. KHEZZAR, « Optimisation de chaine de conversion de l'énergie photovoltaïque en énergie électrique », Thèse de Doctorat soutenue le 23/02/2017. 136 pages
- [7] O. BADIAA, « Optimisation de l'irradiation solaire sur les capteurs photovoltaïques à structure porteuse statique », Mémoire de Master soutenu en Juin 2016. 71 pages.
- [8] « [www.agnetosynergie.com/google](http://www.agnetosynergie.com/google) » : Rayonnement solaire et photovoltaïque magnéto synergie. Consulté le25/02/2019.
- [9] M. L LOUAZENE, « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site d'Ouargla », Mémoire de magister soutenu le12/06/2008. 101 pages.
- [10] Y. THIAUX, « Optimisation de profils de consommation pour les coûts économiques et énergétique du cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybride évaluation du potentiel de la technologie Li-Ion », Thèse de Doctorat Soutenu le 08/08/2010. 184 pages.
- [11] S. BENSALÉN, « Option Energétique et Mécanique des fluides : Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires », Mémoire de Magister Soutenu le 06/01/2011. 67 Pages.

- [12] O. BENSEDDIK et F. DJALOU, « Etude et optimisation de fonctionnement d'un système photovoltaïque », Mémoire de master soutenu le 27/06/2012. 75 pages.
- [13] A.C. PASTOR, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », Thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse 2005. Soutenu le 29/09/2006. 146 pages.
- [14] Y. LASMI, « Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes », Mémoire de Magister Soutenu le 09/12/2013. 100 pages.
- [15] M.M. NADJIB et H.C EDDINE, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau », Mémoire de Master soutenu le 25/06/2013. 73 pages.
- [16] M. MERAH et M.Z KARI, « Conception, simulation et réalisation d'un onduleur assisté (Grid-tie Inverter) », Mémoire de Master académique soutenu le 16/06/2015. 91 pages.
- [17] F.Z. ZERHOUNI, M. ZEGRAR, S. KADDOUR BRAHIM et A. BOUDGHENE STAMBOULI, « Optimisation d'un système a énergie verte avec validation pratique », Revue des énergies renouvelables, vol.11, No1 (2008) P41-49.
- [18] A MOUSSA A. SAADI, « Etude comparative entre les technique d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque », Larhyss journal N01, p 57-68, Mai 2002.
- [19] M. ADOUANE, M. HADDADI, N. BENAMRANE, K. TOUAFEK, A. KHELIFA et I. TABET, « Evaluation de l'influence de l'inclinaison des Modules photovoltaïque sur la production de l'énergie d'un système hybride », Revue des Energie renouvelables SIENR'14 Ghardaïa P.87-92 2014.
- [20] A.S ALI, I.M FAROUKOU et M.A ABDOULAYE, « Photovoltaïque Hydroélectricité Eolienne(PHE) et Photovoltaïque Thermique énergétique Biomasse (PTB) », Mémoire de Licence 55 pages. Soutenu le 17/03/2015.

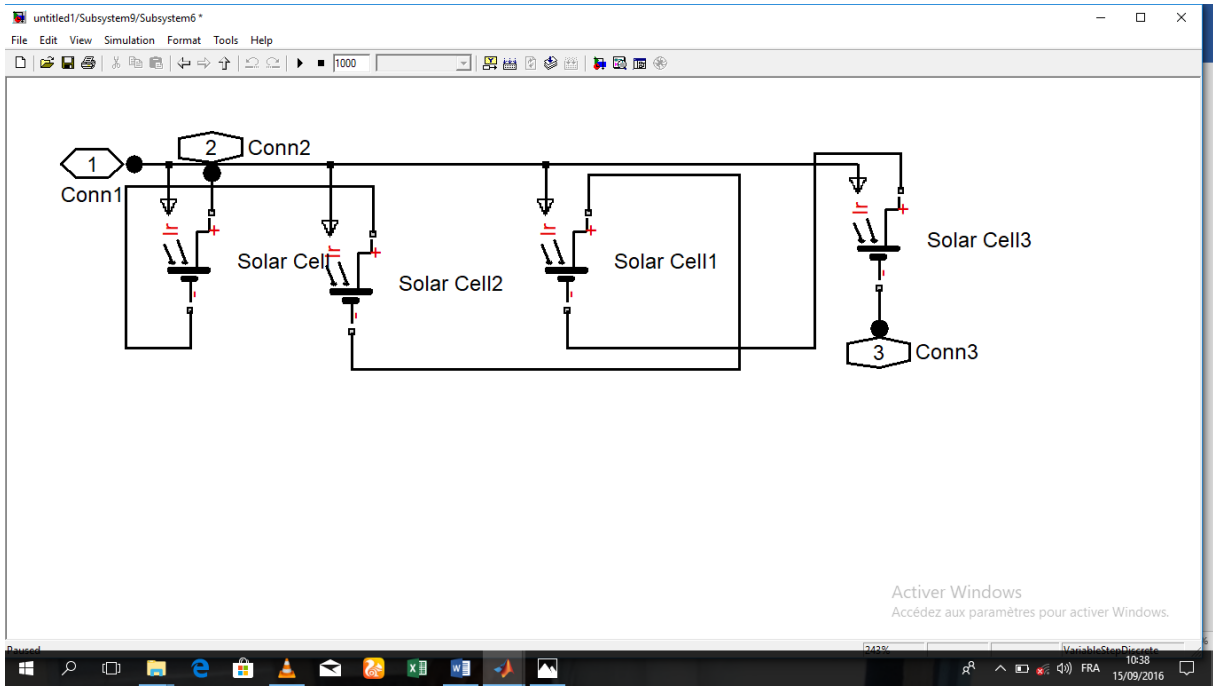
# ANNEXES



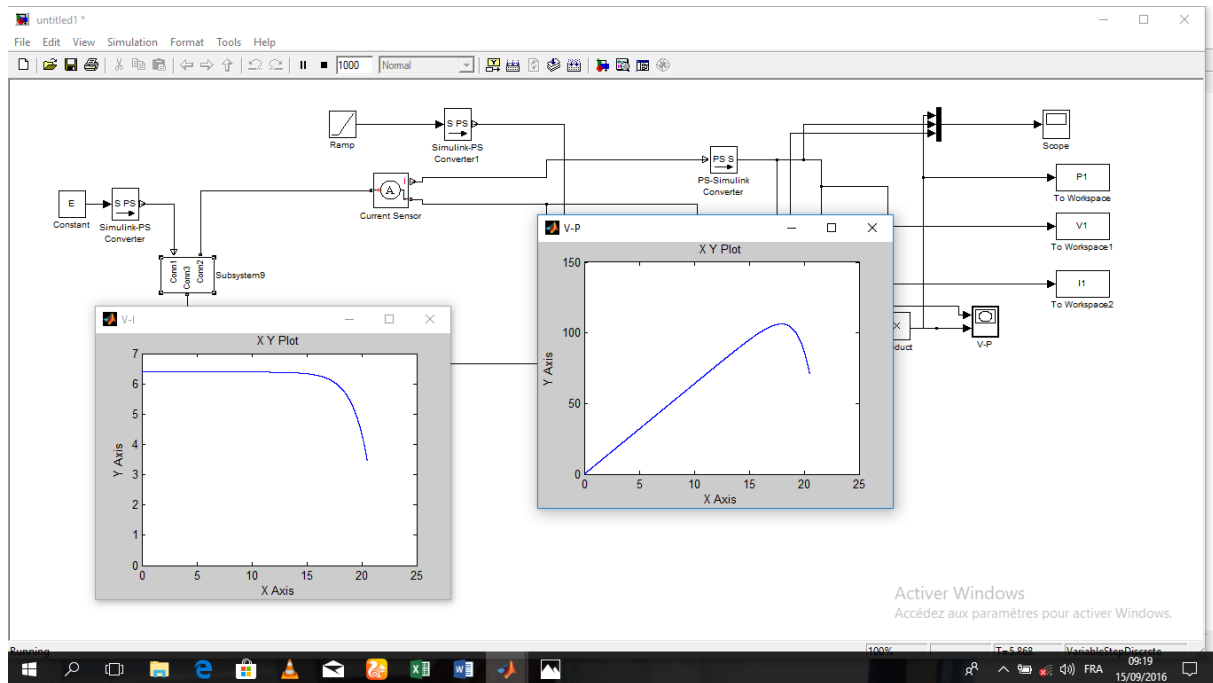
Annexe 1: Image de schéma bloc de Simulink



Annexe 2: Image de montage de neuf (9) système constituant le Module PV



**Annexe 3:** Image de montage en serie de quatre (4) cellules constituant un système



**Annexe 4:** Image en plein simulation du Module PV SA-80