

République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'enseignement supérieur

Et de la recherche scientifique

Université SAAD DAHLEB de Blida -1-

Département des Energies Renouvelables

Option : Conversion Photovoltaïque



# MEMOIRE

DE FIN D'ETUDE

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

*Caractérisation des cellules  
photovoltaïques sous forte concentration  
en conditions réelles*

**Présenté par : Babouri Nadia**

Devant le jury composé de :

Monsieur : Doumaz Toufik

USDB

Président

Monsieur : SAID Noureddine

CDER

Encadreur

Monsieur : Bouzaki Mohammed Mostafa

USDB

Examineur

**Blida, 2020 /2021**

## ملخص:

الهدف من المشروع المقترح هو الوصول إلى فهم أفضل للسلك الكهربائي والبصري للخلايا الكهروضوئية تحت تركيز شمسي عالي، في ظروف محيطية متغيرة تخصص الدراسة لتحقيق مقعد اختبار خارجي يتكون من طبق تعويض مغطى بغشاء عاكس للغاية حيث يتم وضع الخلايا الشمسية أحادية البلورية في بؤرة تركيزه. ستكون المعلمات التي سيتم تمييزها بشكل أساسي تيار الدائرة القصيرة  $I_{sc}$ ، والجهد  $V_{co}$ ، وعامل الشكل، والكفاءة الكهربائية والطاقة المنتجة.

كلمات مفتاحية: تركيز شمسي، طبق تعويض، خلايا كهروضوئية، بؤرة تركيز.

## Résumé :

Le projet proposé a pour objectif d'amener vers une meilleure compréhension du comportement électrique et optique des cellules photovoltaïques sous forte concentration solaire, dans des conditions environnantes variables. L'étude est consacrée à la réalisation d'un banc de test en extérieur composé d'une parabole offset tapissée d'un film hautement réfléchissant où sont placées des cellules solaires monocristallines en son foyer. Les paramètres à caractériser seront principalement le courant de court-circuit  $I_{cc}$ , la tension  $V_{co}$ , le facteur de forme, le rendement électriques et la puissance produite.

Mots clés : concentration solaire, parabole offset, cellule monocristalline, foyer, l'éclaircissement

## Abstract:

The proposed project aims to provide a better understanding of the electrical and optical behavior of photovoltaic cells under high solar concentration, in variable environmental conditions. The study is devoted to the realization of an outdoor test bench composed of an offset dish covered with highly reflective film where monocrystalline solar cells are placed in its focus. The parameters to be characterized will be mainly the short circuit current  $I_{cc}$ , the voltage  $V_{co}$ , the form factor, the electrical efficiency and the power produced.

Key words: Solar concentration, offset dish, monocrystalline cell, focus, illumination.

## Remerciements

*La réalisation de ce mémoire a été possible grâce aux efforts de nombreuses personnes à qui nous voudrions témoigner toute notre reconnaissance.*

*En tout premier lieu, nous remercions le bon Dieu, tout puissant, de nous avoir donné la sagesse, ainsi que le courage pour dépasser toutes les difficultés.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur **Said Noureddine**, pour avoir proposé un sujet de recherche passionnant, pour son aide, sa disponibilité, son suivi et pour toutes les informations qu'il m'a prodigué tout au long de la période du travail malgré les obstacles afin de mener ce travail à bon port.*

*Je suis très satisfaite d'avoir travaillé avec Monsieur **Doumaz Toufik**, je lui suis honoré d'adresser mes remerciements les plus sincères, dont j'ai tiré un immense profit de son savoir, de ses conseils utiles de discussions fertiles.*

*Je tiens à remercier profondément monsieur **Charane Hamid** et **Bourrai Azzedine**. Chacun d'entre vous a énormément contribué dans la réalisation de ce manuscrit, je parlerai même d'un travail d'équipe. Vous étiez énormément présent au cours de la réalisation de ce mémoire, m'apportant tous les jours de nombreux conseils, de nombreuses remarques et un soutien continue.*

*Je remercie l'intégralité des membres du jury de soutenance pour avoir pris le temps de lire ce manuscrit et pour leurs remarques pertinentes.*

*Ça serait inconcevable de ne pas remercier les enseignants du département des énergies renouvelables qui ont contribué à ma formation et mon apprentissage tout au long de ces 5 dernières années, et sans qui je ne serais là où j'en suis aujourd'hui.*

## **Dédicace**

A mon très cher père

Grace à toi papa j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité, tes conseils ont toujours guidé mes pas vers la réussite. Ta compréhension et ton encouragement sont pour moi le soutien indispensable que tu as toujours su m'apporter, que dieu le tout puissant te préserve, et te protège de tous mal.

A ma très chère mère

Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que tu as déployés pour mon éducation. Vous m'avez aidé et soutenu pendant de nombreuses années avec à chaque fois une attention renouvelée. Puisse Dieu, tout puissant vous combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie.

A mon frère Mayes et mes chères sœurs.

A tous mes amis(es) pour m'avoir soutenu et conseillé et pour avoir été là pour moi dans toutes les circonstances.

# Nomenclature-symboles-acronymes

paramètre	Nom	Unité
$\lambda$	longitude	Degré (°)
$\Phi$	latitude	Degré (°)
$\Delta$	Déclinaison solaire	Degré (°)
$\omega$	Angle horaire	Degré (°)
TSV	Temps solaire vrai	heures
TSL	Temps solaire local	heures
TU	Temps universel	heures
H	Hauteur angulaire	Degré (°)
A	azimut	Degré (°)
G	Rayonnement global	[W/m <sup>2</sup> ]
I	Rayonnement direct	[W/m <sup>2</sup> ]
D	Rayonnement diffus	[W/m <sup>2</sup> ]
I <sub>0</sub>	Constante solaire hors atmosphère	-
T <sub>a</sub>	Température ambiante	[k]
DNI	Insolation normale directe	[W/m <sup>2</sup> ]
W <sub>s</sub>	Vitesse du vent	[m/s]
X	Facteur de concentration	
F	Distance focale	[m]
C <sub>g</sub>	Concentration géométrique	-
C <sub>o</sub>	Concentration optique	-
FF	Facteur de forme	-
$\eta$	Le rendement	%
R <sub>s</sub>	Résistance série	[ $\Omega$ ]
I <sub>sc</sub>	Courant de court-circuit	[A]
V <sub>oc</sub>	Tension de circuit ouvert	[V]
$\sigma$	Constante de Stefan Boltzmann	[W/m <sup>2</sup> .K <sup>-4</sup> ]
H	Taille de parabole	[m]
A <sub>s</sub>	Surface du paraboloïde	[m <sup>2</sup> ]
A <sub>x</sub>	Surface d'une parabole	[m <sup>2</sup> ]
P	Rayon parabolique	[m]
CSTS	Concentrator standard test conditions	
HCPV	High concentrator photovoltaic	
IV	Caractéristique courant -tension	
LCPV	Low concentrator photovoltaic	
NREL	National renewable energy laboratory	
Tcell	Température de la cellule	

# Sommaire

Résumé.....	I
Remerciements .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Dédicace .....	III
Nomenclature-symboles-acronymes .....	IV
Listes des figures .....	VIII
Listes des tableaux .....	X
Introduction générale.....	2
I.1 Introduction :.....	5
I.2 Gisement solaire.....	5
I.2.1 L’histoire de l’énergie solaire .....	5
I.2.2 Le soleil :.....	6
I.2.3 Le mouvement de la terre autour du soleil.....	7
I.2.3.1 La sphère céleste.....	8
I.2.3.2 Les coordonnées célestes.....	9
I.2.4 Eclairages solaires :.....	13
I.2.4.1 Eclairage solaire direct.....	13
I.2.4.2 Eclairage solaire diffus.....	14
I.2.4.3 Rayonnement réfléchi (albédo) :.....	14
I.2.4.4 Eclairage global :.....	15
I.2.4.5 Distribution Spectrale du rayonnement.....	15
I.2.5 Le solaire photovoltaïque dans le monde .....	16
I.2.6 Gisement solaire en Algérie .....	17
I.3 La conversion photovoltaïque .....	19
I.3.1 Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques.....	19
I.3.2 Paramètres photovoltaïques :.....	22
I.3.3 Etat de l'art sur les rendements .....	23
I.3.4 Caractéristique électrique sous illumination.....	26
I.3.5 Caractéristique électrique sous obscurité.....	27
I.3.6 Circuits électriques équivalent d’une cellule photovoltaïque.....	28
I.3.6.1 Modèle à une diode .....	28

I.3.6.2	Modèle à deux diodes .....	29
I.4	Conclusion .....	32
II.1	Introduction.....	34
II.2	Aperçue sur la concentration photovoltaïque .....	34
II.3	Etat de l'art du CPV.....	35
II.3.1	Types de concentrateurs solaires.....	36
II.4	Modélisation du concentrateur.....	39
II.4.1	Considérations géométries.....	39
II.5	Caractéristiques des optiques à concentration :.....	44
II.5.1	2.4.1 La concentration :.....	44
II.5.2	Efficacité du concentrateur .....	45
II.5.3	L'importance de la concentration solaire.....	45
II.6	Caractéristiques électriques des systèmes à concentration photovoltaïque .....	46
II.7	Caractéristiques du récepteur.....	46
II.8	Conclusion .....	47
III.2	Introduction.....	49
III.3	Description des différentes parties du prototype.....	50
III.3.1	Le réflecteur : .....	50
III.3.2	Description du récepteur.....	51
III.3.3	L'expérimentation .....	52
III.3.3.1	Détermination du foyer de la parabole.....	52
III.3.3.2	Mesure de la température du foyer.....	53
III.3.3.3	Installation du concentrateur.....	55
III.3.3.4	Mesure du rayonnement solaire.....	55
III.3.3.5	Acquisitions des données .....	56
III.3.3.6	Les thermocouples .....	56
III.3.4	Techniques de mesure et raccordements :.....	56
III.3.4.1	Principe :.....	56
III.3.4.2	Principe de fonctionnement.....	59
III.4	Conclusion .....	61
IV.2	Introduction.....	63
IV.3	Teste et résultats sous un soleil .....	63
IV.4	Paramètres de caractérisation de tous les tests .....	68
IV.4.1	La caractéristique I (V) et P(V) sous concentration .....	69

IV.5	Comparaison des résultats .....	75
	Conclusion générale et perspective .....	77



# Listes des figures

## Chapitre I

<b>Figure (I-1)</b> :structure du soleil [2].....	7
<b>Figure (I-2)</b> :Mouvement de la terre autour du soleil.....	8
<b>Figure(I-3)</b> :La sphère céleste .....	9
<b>Figure (I- 4)</b> :Coordonnée terrestres [5] .....	10
<b>Figure (I- 5)</b> :La déclinaison du soleil en fonction des jours[5].....	11
<b>Figure (I- 6)</b> :Angle horaire $\omega$ du soleil .....	12
<b>Figure(I-7)</b> :Les coordonnées horizontales [5]. .....	13
<b>Figure (I-8)</b> :Valeur des éclairements en fonction de la qualité du ciel.....	13
<b>Figure (I-9)</b> : Composantes du rayonnement solaire au sol.....	15
<b>Figure (I-10)</b> :distribution spectrale du rayonnement.....	16
<b>Figure (I-11)</b> :Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel .....	18
<b>Figure (I-12)</b> :Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné. [2] .....	19
<b>Figure (I-13)</b> :représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque .....	20
<b>Figure (I-14)</b> :Les principaux Types de cellule .....	21
<b>Figure (I-15)</b> : Caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque.....	22
<b>Figure (I-16)</b> :Développement du rendement des cellules photovoltaïques (pour des différents filières)24	
<b>Figure (I-17)</b> :Estimations de l'évolution des rendements pour des cellules multi jonctions au cours des années à venir (source : séminaire de Mathieu Baudrit à Lyon en 2015). Les limites de rendements sont issues de l'article de Yamaguchi [8].....	25
<b>Figure (I-18)</b> :Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. ....	26
<b>Figure (I-19)</b> :Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. [13].....	27
<b>Figure (I-20)</b> :Schéma électrique équivalent d'une diode sous obscurité [12]. .....	27
<b>Figure (I-21)</b> :Caractéristique $I(V)$ typique d'une cellule photovoltaïque sous obscurité (courbe noire) et sous illumination (courbe orange) en mode générateur[12].....	28
<b>Figure (I-22)</b> :schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode[9]. .....	29
<b>Figure (I-23)</b> :Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes.[9].....	29
<b>Figure (I-24)</b> :caractéristique $I-V$ selon différents niveaux d'éclairement.....	30
<b>Figure (I-25)</b> :caractéristique $I-V$ selon différentes plages de la température .....	31
<b>Figure (I-26)</b> :caractéristique $I-V$ selon différentes plages de température. ....	31

## Chapitre II

<b>Figure (II- 1)</b> :Capacité installée annuelle pour le CPV.....	35
<b>Figure (II- 2)</b> :Deux technologies de modules CPV en centrale ; à gauche les modules HCPV Suncore sur la centrale de Golmud en Chine (60MW) et à droite le système LCPV EUCLIDES sur La central prototype de Tenerife en Espagne (500kW). [15].....	36
<b>Figure (II- 3)</b> :Système Greenfield .....	37
<b>Figure (II- 4)</b> :Miroirs paraboliques .....	38

<b>Figure (II- 5):</b> <i>Loupe optique.</i> .....	38
<b>Figure (II- 6) :</b> <i>Fonctionnement d'une cellule sous lentille de Fresnel.[17]</i> .....	39
<b>Figure (II- 7):</b> <i>Propriétés géométriques de la parabole</i> .....	40
<b>Figure(II- 8):</b> <i>Section d'une parabole possédant un foyer commun F et le même diamètre d'ouverture.</i> .....	41
<b>Figure (II- 9):</b> <i>Système optique d'une surface parabolique</i> .....	43
<b>Figure(II- 10):</b> <i>Les deux façons de définir dans un paraboloïde offset (vue de profil). [21]</i> .....	43
<b>Figure (II- 11):</b> <i>Dimensions d'un réflecteur offset.</i> .....	44

## *Chapitre III*

<b>Figure (III – 1):</b> <i>vue générale du prototype</i> .....	49
<b>Figure (III -2):</b> <i>les tapes de réalisation du réflecteur</i> .....	50
<b>Figure (III -3):</b> <i>a) Vue arrière du prototype , b) vue de face de la parabole avant le début de l'expérience.</i> .....	51
<b>Figure (III -4):</b> <i>l'emplacement des cellules sur le dissipateur de chaleur</i> .....	52
<b>Figure (III -5) :</b> <i>détermination du foyer de la parabole</i> .....	53
<b>Figure (III -6):</b> <i>thermocouple de type k.</i> .....	53
<b>Figure (III -7):</b> <i>Schéma explicatif de disposition des thermocouples</i> .....	54
<b>Figure (III -8):</b> <i>l'emplacement des thermocouples dans l'acquisition de données.</i> .....	54
<b>Figure (III -9):</b> <i>Pyranomètre pour la mesure de l'éclairement.</i> .....	55
<b>Figure (III -10):</b> <i>Enregistreur de données type FLUKE HYDRA SERIES II</i> .....	56
<b>Figure (III - 11):</b> <i>Principe de fonctionnement d'un thermocouple</i> .....	57
<b>Figure (III - 12):</b> <i>technique de mesure sans concentration.</i> .....	59
<b>Figure (III - 13):</b> <i>technique de mesure avec concentration</i> .....	60

## *Chapitre IV*

<b>Figure (IV -1):</b> <i>programme de simulation sous Matlab</i> .....	63
<b>Figure (IV -2):</b> <i>la courbe I(V) sous un soleil avec <math>E_g=800w/m^2</math></i> .....	64
<b>Figure (IV -3):</b> <i>la courbe P(V) sous un soleil avec <math>E_g=800w/m^2</math></i> .....	64
<b>Figure (IV -4):</b> <i>la courbe I(V) sous un soleil avec <math>E_g=566w/m^2</math></i> .....	65
<b>Figure (IV -5):</b> <i>la courbe P(V) sous un soleil avec <math>E_g=566w/m^2</math></i> .....	66
<b>Figure (IV -6):</b> <i>la courbe I(V) sous un soleil avec <math>E_g=226w/m^2</math></i> .....	67
<b>Figure (IV -7):</b> <i>la courbe P(V) sous un soleil avec <math>E_g=226w/m^2</math></i> .....	67
<b>Figure (IV -8):</b> <i>les courbes I(V) sous un soleil pour les différents éclairements</i> .....	68
<b>Figure (IV -9):</b> <i>les courbes P(V) sous un soleil pour les différents éclairements</i> .....	69
<b>Figure (IV -10):</b> <i>la courbe I(V) sous concentration avec <math>I_d=715w/m^2</math></i> .....	70
<b>Figure (IV -11):</b> <i>la courbe P(V) sous concentration avec <math>I_d=715w/m^2</math></i> .....	70
<b>Figure (IV -12):</b> <i>la courbe I(V) sous concentration avec <math>I_d=510w/m^2</math></i> .....	71
<b>Figure (IV -13):</b> <i>la courbe P(V) sous concentration avec <math>I_d=510w/m^2</math></i> .....	71
<b>Figure (IV -14):</b> <i>la courbe I(V) sous concentration avec <math>I_d=194w/m^2</math></i> .....	72
<b>Figure (IV -15):</b> <i>la courbe P(V) sous concentration avec <math>I_d=194w/m^2</math></i> .....	73
<b>Figure (IV -16):</b> <i>les courbes I(V) sous concentration pour les différents éclairements</i> .....	73
<b>Figure (IV -17):</b> <i>les courbes P(V) sous concentration pour les différents éclairements</i> .....	74

## Listes des tableaux

### *Chapitre I*

<b>Tableau (I-1) :</b> <i>albédo solaire de différentes surfaces</i> [1].....	14
<b>Tableau (I-2) :</b> production d'électricité solaire photovoltaïque en Twh [7] .....	17
<b>Tableau (I-3) :</b> potentiel solaire en Algérie[5] .....	18
<b>Tableau (I-4) :</b> les principaux types de cellules et leurs rendements [11].....	21

### *Chapitre II*

<b>Tableau(II- 1) :</b> <i>les avantages et les inconvénients des systèmes à concentration</i> [19].....	45
--	----

### *Chapitre III*

<b>Tableau (III -1) :</b> Caractéristiques géométrique du réflecteur .....	51
<b>Tableau (III - 2) :</b> Tolérance des thermocouples :[21] .....	57
<b>Tableau (III -3) :</b> testes des températures au niveau du foyer.....	58

### *Chapitre IV*

<b>Tableau (IV -1):</b> valeurs mesurées de la tension et du courant généré par les cellules sous un éclairage de 800w/m <sup>2</sup> .....	64
<b>Tableau (IV -2):</b> valeurs mesurées de la tension et du courant généré par les cellules sous un éclairage de 566w/m <sup>2</sup> .....	65
<b>Tableau (IV -3):</b> valeurs mesurées de la tension et du courant généré par les cellules sous un éclairage de 226w/m <sup>2</sup> .....	66
<b>Tableau (IV -4):</b> les résultats de la caractérisation de tous les tests.....	68
<b>Tableau (IV -5):</b> valeurs mesurées de la tension et du courant généré par les cellules sous un éclairage Id=715w/m <sup>2</sup> .....	69
<b>Tableau (IV -6):</b> valeurs mesurées de la tension et du courant généré par les cellules sous un éclairage Id=510w/m <sup>2</sup> .....	71
<b>Tableau (IV -7):</b> valeurs mesurées de la tension et du courant généré par les cellules sous un éclairage Id=194w/m <sup>2</sup> .....	72
<b>Tableau (IV -8):</b> les résultats de la caractérisation de tous les tests.....	74

**Chapitre**

**Introdudctif**

## Introduction générale

Depuis plus d'un siècle un important développement économique, le développement industriel, l'augmentation des usines et du parc automobile, et la multiplication des équipements domestiques ont provoqué une croissance importante de la demande énergétique. Malheureusement, cette croissance de la demande a été majoritairement couverte par l'importation des sources d'énergies fossiles. Et dans le cadre de changement climatique où la limitation des gaz à effet de serre est essentielle, et devant la menace d'épuisement des combustibles fossiles, le défi présenté est de trouver des sources d'énergie innovantes pour répondre à une nécessité toujours plus pressante.

Dans l'optique de la production d'électricité, l'énergie solaire est une source d'énergie propre et inépuisable. Actuellement les technologies de concentration solaire sont celles qui présentent le plus de possibilités pour une exploitation commerciale. [1]

Dans ce contexte plusieurs architectures de cellules solaires sont apparues pour fabriquer un module photovoltaïque à haute rendement, l'expérience montre que le fonctionnement des cellules solaire dépend fortement de plusieurs paramètres, internes et externes (lié à l'environnement du fonctionnement : éclairage, concentration, température, etc.). L'étude de l'influence de ces différents paramètres sur le fonctionnement des cellules solaire est possible à travers la connaissance de l'influence de chaque paramètre sur la caractéristique I-V de la cellule. Dans ce sens ce projet consiste à la conception et la réalisation d'un banc d'essai extérieur de caractérisation de module CPV sous forte concentration solaire, la méthodologie de teste proposée dans cet article utilise une parabole de télécommunication tapissée d'un film réflecteur haute performance dans laquelle on place en son foyer des cellules photovoltaïques au silicium monocristallin. Le principal avantage de l'expérimentation solaire en extérieur est de travailler dans des conditions réelles de fonctionnement d'une installation solaire. L'insolation (irradiation solaire) et les facteurs ambiants ne sont pas contrôlables, mais les conditions de test extérieures peuvent être étudiées et enregistrées en mesurant les grandeurs physiques avec des instruments appropriés. Un autre avantage de l'utilisation de la lumière directe du soleil est d'éviter l'utilisation de sources artificielles de lampe ou de simulateurs solaires, qui ne peuvent que tenter de reproduire la distribution spectrale, la divergence et l'intensité de la lumière solaire.

Notre projet a pour objectif d'amener vers une meilleure compréhension des comportements électrique et optique des cellules photovoltaïques sous forte concentration, dans des conditions environnantes variables. Ce manuscrit s'articule autour de quatre axes :

La première partie portera sur des rappels théoriques sur les cellules photovoltaïques leur fonctionnement, les caractéristiques électriques de la cellule, nous présenterons aussi des généralités sur le gisement solaire dans le monde et en Algérie.

Le second chapitre présente une étude approfondie sur la concentration solaire.

Le troisième chapitre est consacré à la réalisation du banc d'essais en extérieur permettant de mesurer les performances électriques et optiques des cellules photovoltaïques. Les résultats des tests et leurs interprétations seront présentés dans le quatrième chapitre.

**Chapitre I :**

**Gisement solaire**

**& cellules**

**photovoltaïques**

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

## I.1 Introduction :

Le travail est essentiellement basé sur la caractérisation des cellules photovoltaïques sous forte concentration solaire dans des conditions environnantes variable, mais pour le faire, il faudrait déjà comprendre les différents phénomènes qui se passent. Dans ce chapitre nous allons aborder les généralités sur le gisement solaire et les cellules photovoltaïques.

## I.2 Gisement solaire

### I.2.1 L'histoire de l'énergie solaire

Il semble que ce soient les Egyptiens qui aient découvert l'effet de serre. Archimède, au 3ème siècle avant J-C, incendie la flotte romaine à Syracuse avec des miroirs plans (ou des boucliers polis). Vers 100 ans après J-C, Héron d'Alexandrie construit un dispositif de pompage de l'eau. En 1615, Salomon de Caus construit une pompe dont la force motrice est fournie par l'air chauffé par le soleil. Au 18ème siècle, Buffon utilise des miroirs concaves à facettes. En 1774, Joseph Priestley concentre les rayons solaires sur de l'oxyde de mercure, et recueille le gaz produit dont la propriété est de faire brûler une bougie plus vivement que l'air : il découvre ainsi l'oxygène, ce qui permet à Lavoisier d'établir la théorie complète de la combustion due à la combinaison d'un corps avec l'oxygène de l'air. Lavoisier lui-même construit un four solaire à l'aide d'une lentille liquide, et réussit à fondre le platine. A la fin du 18ème siècle, le suisse H.B. de Saussure crée des machines solaires (deux vitres planes sur un collecteur orienté vers le soleil). En 1872, dans le désert d'Atacama, au Chili, on construit un distillateur solaire de 5000 m<sup>2</sup> pour fournir de l'eau à une mine de nitrate de sodium.

En 1878, A.Mouchot, professeur au lycée de Tours, invente une machine à vapeur fonctionnant sous 3,5 atmosphères à l'aide d'un grand miroir conique et servant à actionner l'imprimerie de l'Exposition Universelle : sa puissance est de deux chevaux pour une surface de collecteurs de 20 m<sup>2</sup>. De 1902 à 1908, Willies et Boyle construisent à Saint-Louis et à Needles, en Californie, des engins de 6 à 20 chevaux fonctionnant à l'eau et au gaz sulfureux. A la même époque, Shuman développe des machines solaires de plusieurs chevaux pour pomper de l'eau. En 1913, avec Boys, il installe près du Caire, une grosse machine de 50 chevaux, avec de longs cylindro-paraboliques qui concentrent les radiations solaires sur une canalisation



# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

centrale avec un facteur de concentration de 4,5 pour pomper de l'eau du Nil à des fins d'irrigation.

G. Abbot qui, à la conférence internationale de l'énergie en 1936, présente une machine à vapeur d'un demi-cheval, et en 1938 en Floride une machine de 1/5 de cheval avec un bouilleur flash, il n'y a aucun autre développement de l'énergie solaire dans les années suivantes. Ce n'est qu'à partir de 1950 que les applications de l'énergie solaire commencent timidement à se développer.

Pendant l'année 1954, trois chercheurs américains (Chapin, Pearson et Prince) mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement (9 %) et les Laboratoires Bell construisent le premier panneau solaire, mais il était trop coûteux pour être produit en série. En 1958 a lieu le premier lancement d'un satellite fonctionnant à l'énergie photovoltaïque. L'industrie spatiale investira beaucoup de fonds dans le développement des panneaux solaires. Pendant les années 1970 et 1980, des efforts sont faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. L'énergie solaire connaîtra un second élan au cours du premier choc pétrolier dans les années 1970. Alors que le prix du pétrole augmente de façon spectaculaire, les panneaux solaires photovoltaïques commencent à être utilisés pour la première fois dans les maisons. En effet, en 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université du Delaware et en 1983, la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000km en Australie. Depuis, les panneaux solaires se sont développés lentement. Des centrales solaires sont en cours de construction dans le monde entier. Les entreprises d'électricité et les gouvernements ont offert des subventions et des réductions pour encourager les propriétaires à investir dans l'énergie solaire pour leur maison. En effet, en 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

[1]

## I.2.2 Le soleil :

Le soleil est l'origine principale de toute forme d'énergie sur terre. Ceci étant vrai autant pour les énergies conventionnelles d'origine fossile, comme les hydrocarbures qui sont

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

la conséquence de la photosynthèse ; que pour les énergies non conventionnelles dites renouvelables, comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne, la biomasse, et l'énergie géothermique. [2]

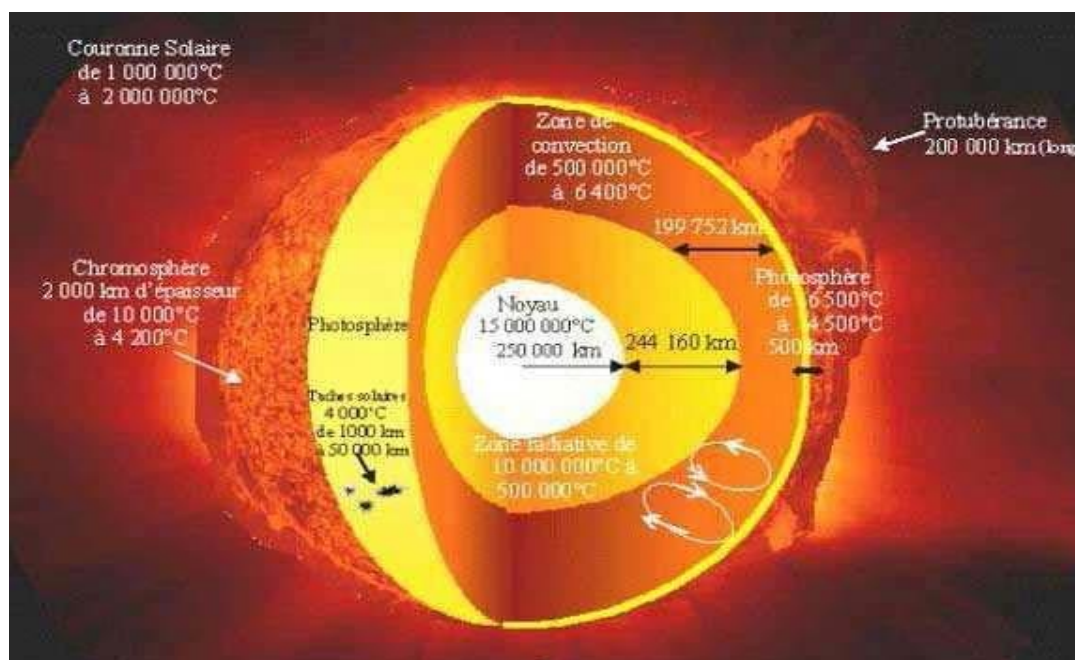


Figure (I -1) : structure du soleil [2]

L'astre solaire est une étoile de 1397 000 km de diamètre (110 fois celui de la terre) au sein duquel se produit une réaction de fusion (fusion d'hydrogène en hélium) générant d'énormes quantités d'énergies. Une toute petite partie de cette énergie arrive sur terre, par rayonnement électromagnétique.

Globalement, l'énergie reçue est néanmoins considérable (1 million de Téra wattheures). Elle est de l'ordre de 10000 fois la consommation énergétique annuelle de la population mondiale. La puissance maximale moyenne délivrée sur terre par mètre carré d'environ 1000 Watts. [1]

## I.2.3 Le mouvement de la terre autour du soleil

Dans son mouvement autour du soleil, la terre décrit une ellipse dont le soleil est l'un de ses foyers, la révolution complète s'effectue en une période de 365,25 jours. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique.

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil : 147 millions de km. Au 22 juin la distance terre-soleil vaut 152 millions de km, c'est le jour ou la terre est la plus éloignée, c'est le solstice d'été. Le 21 mars et le 21 septembre sont appelés respectivement équinoxes de printemps et équinoxe d'automne. Aux équinoxes le jour et la nuit sont égaux. En plus de sa rotation autour du soleil, la terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cette rotation effectuée en une journée.

Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, ils font entre eux un angle appelé inclinaison égale à  $3,27^\circ$ . [3]

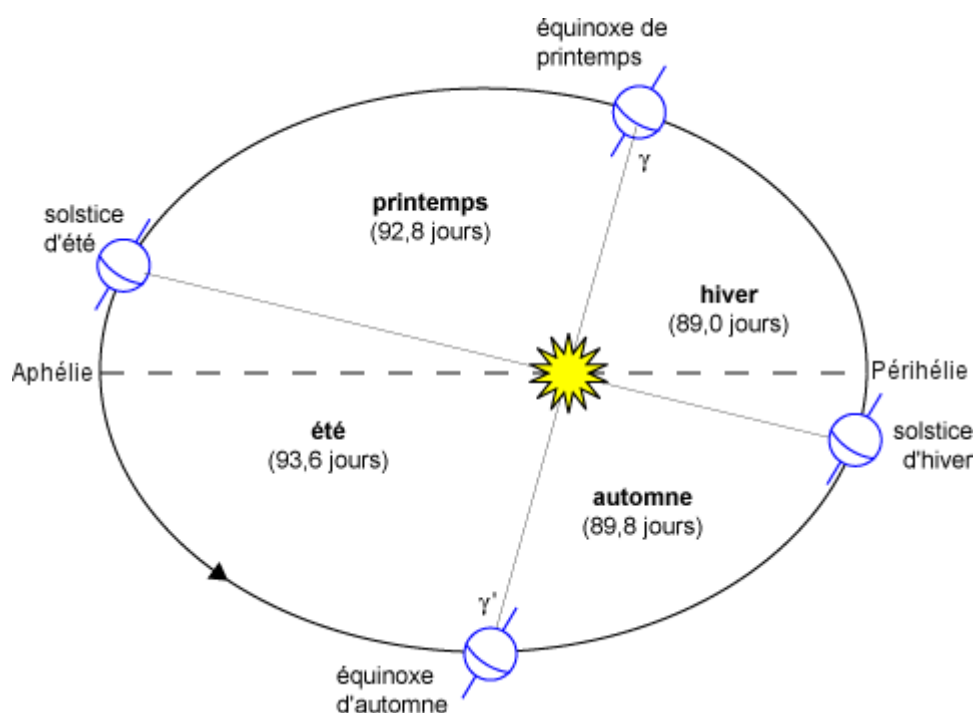


Figure (I -2) : Mouvement de la terre autour du soleil

## I.2.3.1 La sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, avec la terre au centre. On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

sphère céleste. On peut résumer les différentes caractéristiques sur la sphère elle-même comme est représenté sur la figure (I-3) :

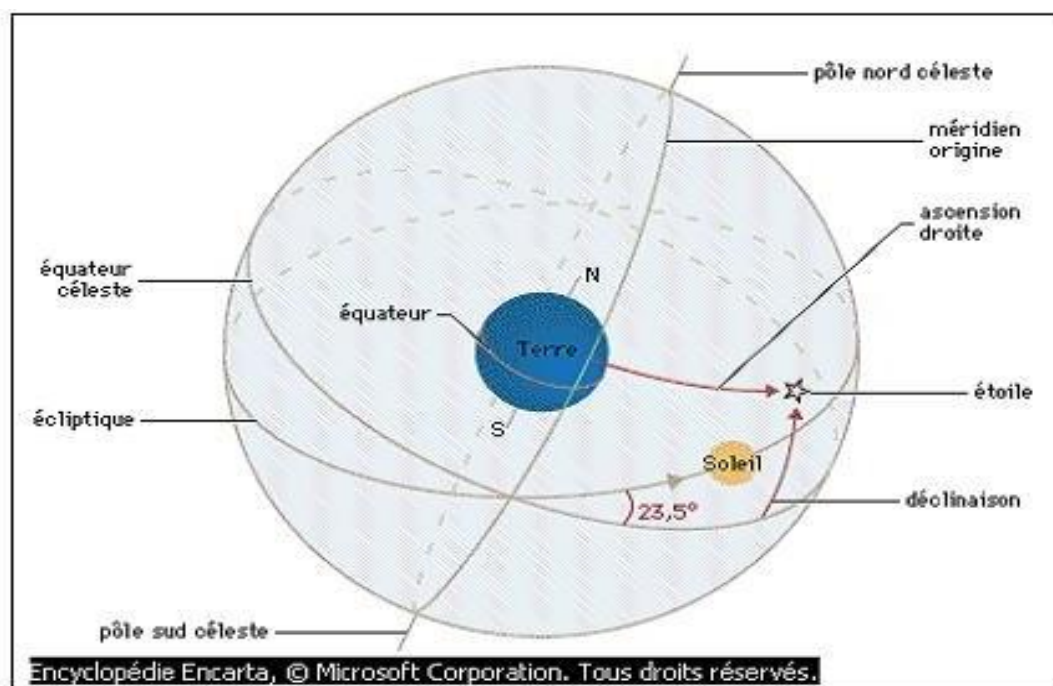


Figure (I-3) : La sphère céleste

La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes. [4]

## 1.2.3.2 Les coordonnées célestes

### • Les coordonnées géographiques

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre.

➤ **La latitude ( $\theta$ )** : c'est l'angle  $\theta$  que fait la verticale du lieu avec le plan équatorial.

Si  $\theta > 0$ , le site se trouve dans hémisphère nord, sinon le site est dans l'hémisphère sud.

➤ **La longitude ( $\varphi$ )** :

C'est l'angle  $\varphi$  formé par le méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré. La longitude est comprise entre -180 (vers l'ouest) et +180 (vers l'est). Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle-même (360°), chaque heure représente 15° d'écart de longitude et donc, chaque degré de longitude représente 4 minutes.

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

- **L'altitude (z)** : c'est la distance verticale exprimé en mètres, séparant le point considéré du relief terrestre du niveau de la mer, pris comme surface de référence. [5]

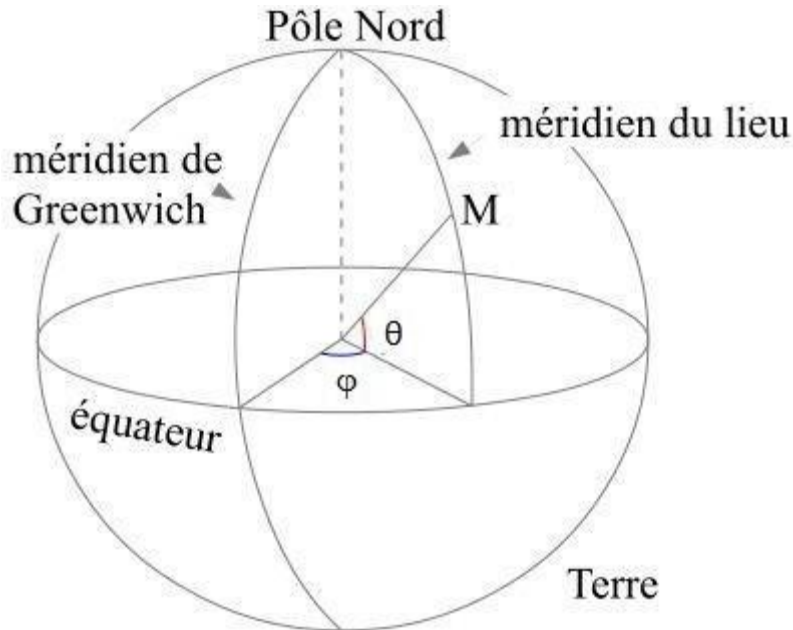


Figure (I- 4) : Coordonnée terrestres [5]

- **Les coordonnées horaires :**

- **La déclinaison solaire  $\delta$ :**
- C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Elle varie tout au long de l'année, entre deux valeurs extrêmes : (-23°45'et+23°45' environ) et elle s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne, sa valeur peut être calculée par la formule de Copper (1967) :

$$\delta = 23.25 \sin(0.986 * (j + 284)) \quad (I-1)$$

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

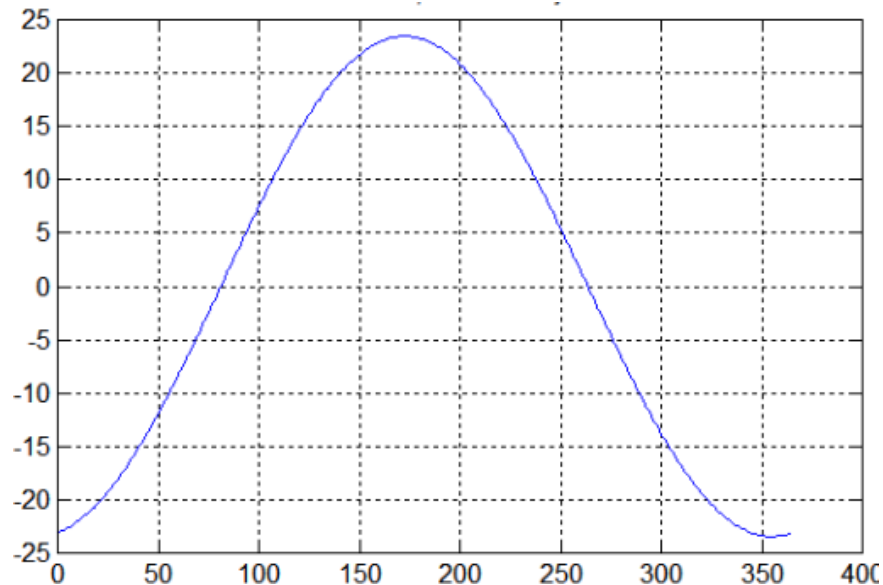


Figure (I- 5) : La déclinaison du soleil en fonction des jours [5]

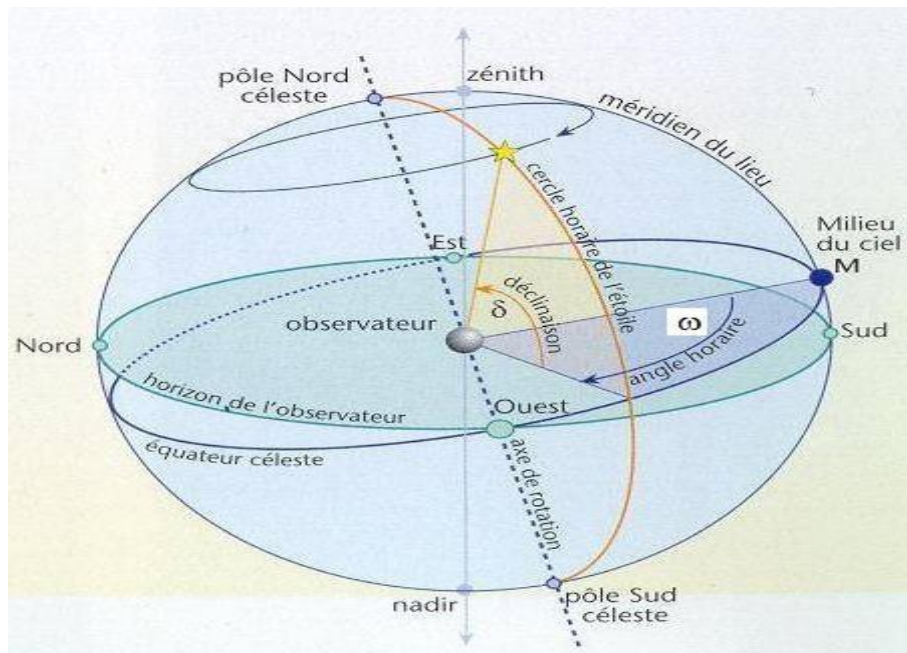
La figure (I- 5) représente l'évolution de la déclinaison au fil de l'année.

## ➤ Angle horaire $\omega$ :

L'angle horaire du soleil est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil si l'on prend comme origine le méridien de Greenwich, l'angle horaire est compris entre  $0^\circ$  et  $360^\circ$ . La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive dans l'après-midi et augmentée de  $15^\circ$  par heure.

$$\omega = 15 * (15 - TSV) \quad (I-2)$$

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques



**Figure (I- 6) :** Angle horaire  $\omega$  du soleil

La figure (I- 6) montre l'angle horaire dans la sphère céleste. [5]

- **Les coordonnées horizontales :**

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles :

- **Hauteur angulaire du soleil (h) :** c'est l'angle formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil. Cette hauteur durant le jour peut varier de 0 (soleil à l'horizon) à 90 (soleil au zénith).

$$h = \sin^{-1}(\sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)) \quad (I-3)$$

- **Azimuth  $\psi$  :** c'est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. La connaissance de l'azimuth du soleil est indispensable pour le calcul de l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale. [5]



# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

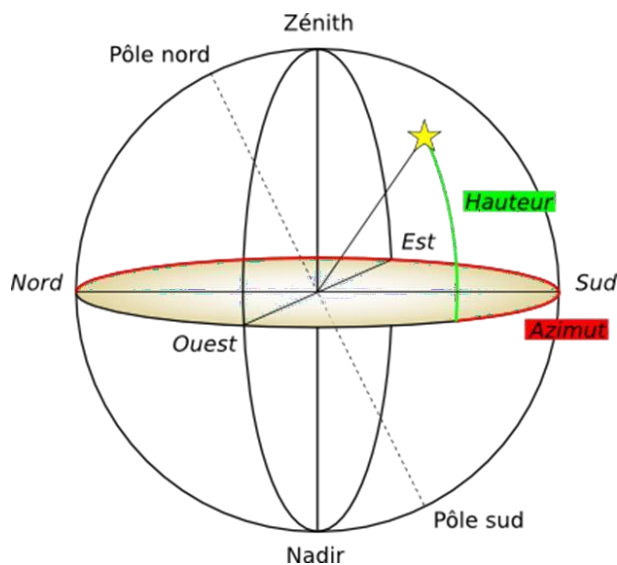


Figure (I-7) : Les coordonnées horizontales [5].

Les coordonnées horizontales, hauteur et azimut, sont représentées dans la figure (I-7).

## I.2.4 Eclairéments solaires :

L'éclairément correspond à la puissance solaire reçue par une surface plane élémentaire, On distingue l'éclairément dû aux rayons solaires directs et celui dû au rayonnement solaire diffusé par le ciel ou réfléchi par une surface (le sol, un mur ...). La figure (I-8) montre l'intensité des éclairéments en fonction de la qualité du ciel. [1]

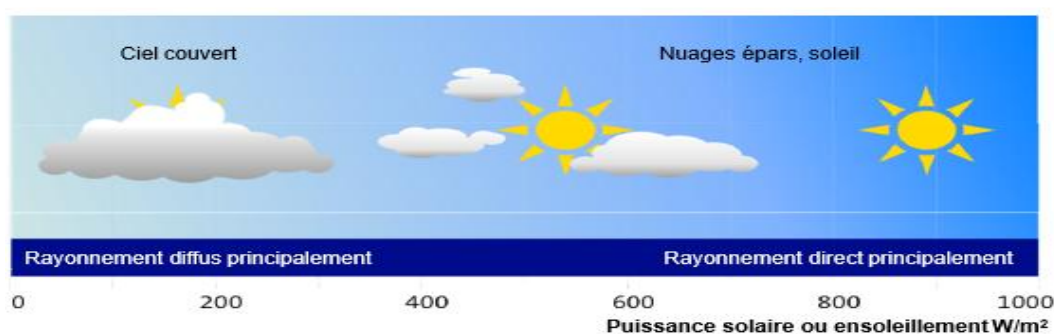


Figure (I-8) : Valeur des éclairéments en fonction de la qualité du ciel.

### I.2.4.1 Eclairément solaire direct

L'éclairément direct est le rayonnement provenant directement du soleil sans avoir été dissipé par l'atmosphère. Il est mesuré par le pyréliomètre qui est un instrument destiné à



# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

la mesure de l'intensité du rayonnement solaire direct. Ce type de rayonnement est nul lorsque le soleil est complètement couvert par les nuages.

## I.2.4.2 Eclairement solaire diffus

L'éclairement diffus est le rayonnement reçu par toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère (déviations de la lumière par les nuages et les molécules diverses). Les couches atmosphériques, modifient la distribution spectrale du rayonnement solaire. Il subit une atténuation à cause des phénomènes d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols. Ainsi par exemple, la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge. Il est mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil. Donc, ce rayonnement est nul que la nuit.

## I.2.4.3 Rayonnement réfléchi (albédo) :

L'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par une surface (sol, des objets...). Cet albédo peut être important lorsque le sol est plutôt réfléchissant (à cause de l'eau, la neige). En toute rigueur la notion d'albédo dépend de la longueur d'onde et de la direction du rayonnement incident ainsi que de la température.

On représente dans le tableau (I-1) quelques valeurs de l'albédo selon la surface du sol.

**Tableau (I-1) :** *Albédo solaire de différentes surfaces* [1]

Surface	Albédo solaire
Mer chaude	0.05
Lune	0.07
Forêt tropicale	0.12
Mer froide	0.15
Pierre, ciment, sol cultivé	0.15 à 0.25
Herbe verte	0.25
Neige fraîche	0.85

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

## I.2.4.4 Eclairement global :

L'éclairement global est la somme de tous les rayonnements reçus, voir figure (I-9), il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre [1].

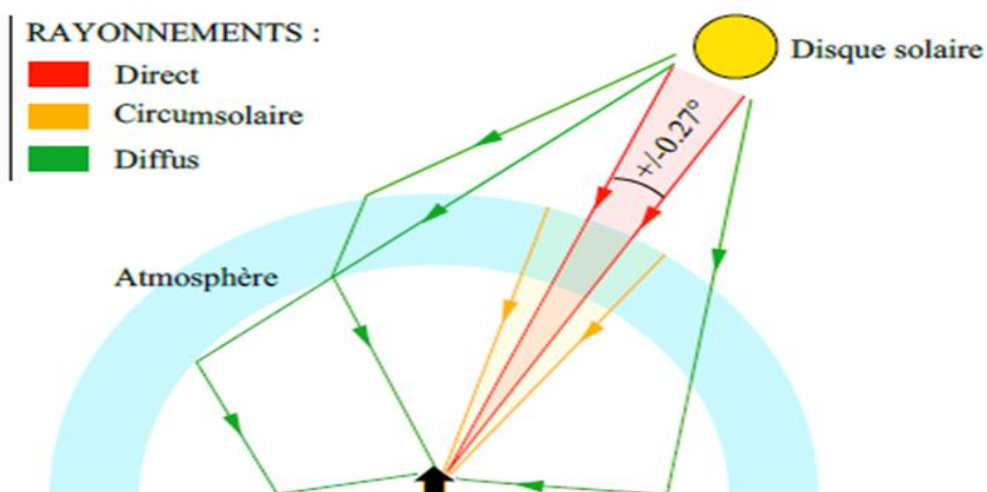


Figure (I-9) : Composantes du rayonnement solaire au sol

## I.2.4.5 Distribution Spectrale du rayonnement

Le soleil nous envoie de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde varie de  $0,22\mu\text{m}$  à  $10\mu\text{m}$ . La figure (I-10) représente la variation de la répartition spectrale de ce rayonnement. Sur ce graphe on constate que pour  $\lambda \leq 0,3\mu\text{m}$  le rayonnement est négligeable alors que pour la partie visible du rayonnement, pour des valeurs entre  $0,3$  et  $0,7\mu\text{m}$  l'absorption par l'atmosphère est faible. [6]

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

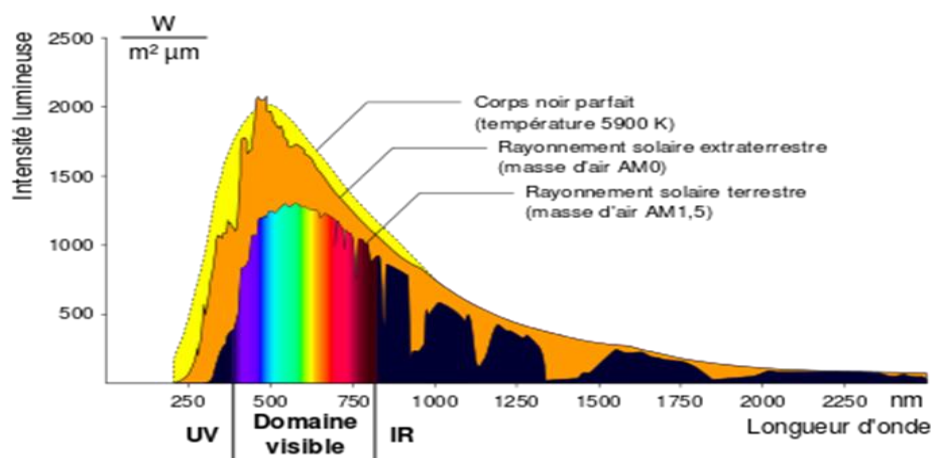


Figure (I-10) : Distribution spectrale du rayonnement

## I.2.5 Le solaire photovoltaïque dans le monde

L'énergie solaire photovoltaïque s'est d'abord développée pour satisfaire des besoins électriques en sites isolés, tels que les régions de montagnes, les îles et les zones rurales des pays en développement, particulièrement en Afrique et en Asie. Depuis le début des années 2000, le développement de l'énergie solaire photovoltaïque a pris une toute autre dimension, à l'échelle mondiale, suite à la prise de conscience de l'enjeu environnemental lié au réchauffement climatique et à la nécessité de développer des énergies renouvelables, non émettrices de CO<sub>2</sub>.

Les principaux pays producteurs de cellules solaires et de panneaux solaires sont la Chine, les Etats-Unis, le Japon et l'Allemagne. La puissance installée dans le monde est passée de quelques Méga watts au début des années 2000 à 102 Gigawatts fin 2012 puis 227 Giga watts fin 2015 et 300 Giga watts fin 2016. Le rythme d'installation de puissance solaire photovoltaïque est actuellement de plus de 70 Giga watts par an. C'est en Asie, notamment en Chine et en Inde, que plus de la moitié des installations solaires sont réalisées. Ci-dessous le détail des puissances solaires photovoltaïques installées dans le monde tableau (I-2). [7]

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

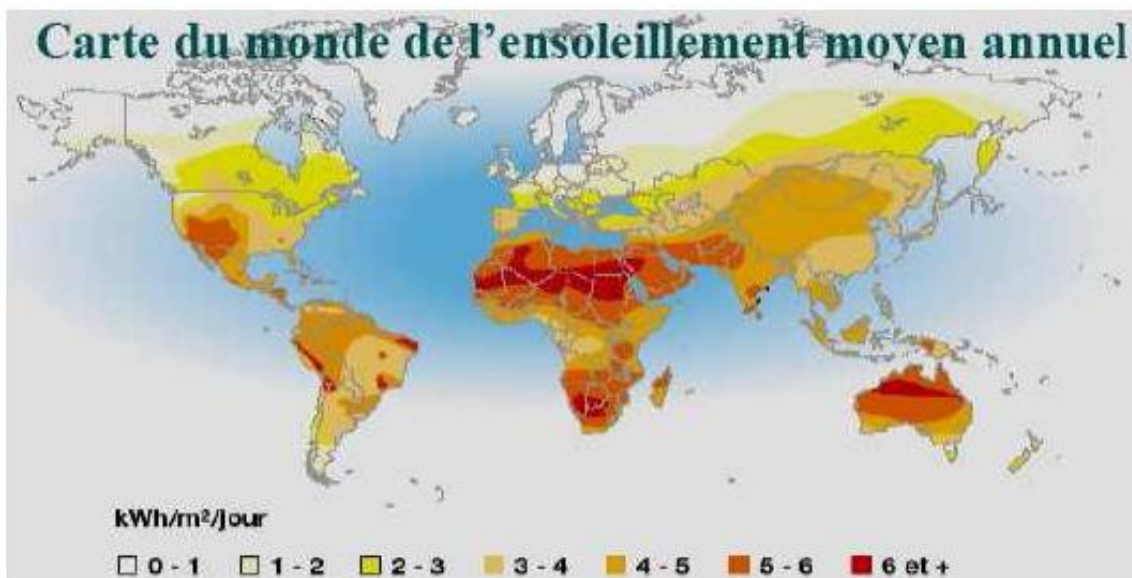
**Tableau (I-2) : Production d'électricité solaire photovoltaïque en TWh [7]**

Production d'électricité solaire photovoltaïque (TWh)										
Pays	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	% 2016	2017*	2018*
 Chine	0,7	2,6	6,4	15,5	29,2	44,8	75,3	23,0 %	117,8	177,5
 États-Unis	3,1	5,3	9,2	14,9	23,1	32,1	46,6	14,2 %	74,0	92,6
 Japon	3,5	4,8	6,6	12,9	23,0	34,8	51,0	15,5 %	61,8	71,7
 Allemagne	11,7	19,6	26,4	31,0	36,1	38,7	38,1	11,6 %	39,4	46,2
 Italie	1,9	10,8	18,9	21,6	22,3	22,9	22,1	6,7 %	24,4	22,7
 Inde	0,1	0,8	2,1	3,4	4,9	5,6	14,1	4,3 %	21,5	30,7
 Royaume-Uni	0,04	0,2	1,4	2,0	4,1	7,5	10,4	3,2 %	11,5	12,9
 France	0,6	2,1	4,0	4,7	5,9	7,3	8,2	2,5 %	9,6	10,2
 Espagne	6,4	7,4	8,2	8,3	8,2	8,3	8,1	2,5 %	8,5	7,8
 Australie	0,4	1,4	2,3	3,5	4,0	5,0	6,2	1,9 %	9,0	12,1
 Corée du Sud	0,8	0,9	1,1	1,6	2,6	4,0	5,1	1,6 %	7,1	9,3
 Chili				0,01	0,5	1,3	2,6	0,8 %	3,9	5,1
 Afrique du Sud				0,05	1,1	2,2	2,6	0,8 %	4,3	4,9
 Thaïlande	0,1	0,1	0,5	1,0	1,6	1,9	2,7	0,8 %	4,5	4,7
 Grèce	0,2	0,6	1,7	3,6	3,8	3,9	3,9	1,2 %	4,0	3,8
 Belgique	0,6	1,2	2,1	2,6	2,9	3,1	3,1	0,9 %	3,3	3,6
 Canada	0,3	0,6	0,9	1,5	2,1	2,9	3,1	0,9 %	3,3	3,5
 Pays-Bas	0,06	0,1	0,2	0,5	0,8	1,1	1,6	0,5 %	2,2	3,2
<b>Monde</b>	<b>32,2</b>	<b>63,2</b>	<b>99,0</b>	<b>139,5</b>	<b>190,2</b>	<b>250,2</b>	<b>328,0</b>	<b>100 %</b>	<b>453,5</b>	<b>584,6</b>

## I.2.6 Gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde comme le montre la figure 11. 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 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup> /an au Nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup> /an au Sud du pays, Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de Gwh. [5]

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques



**Figure (I-11) :** Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel

En raison de sa situation géographique, l'Algérie est classée comme étant l'un des pays les mieux dotés en ressources solaires au monde et au bassin méditerranéen ; soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique et 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque [8].

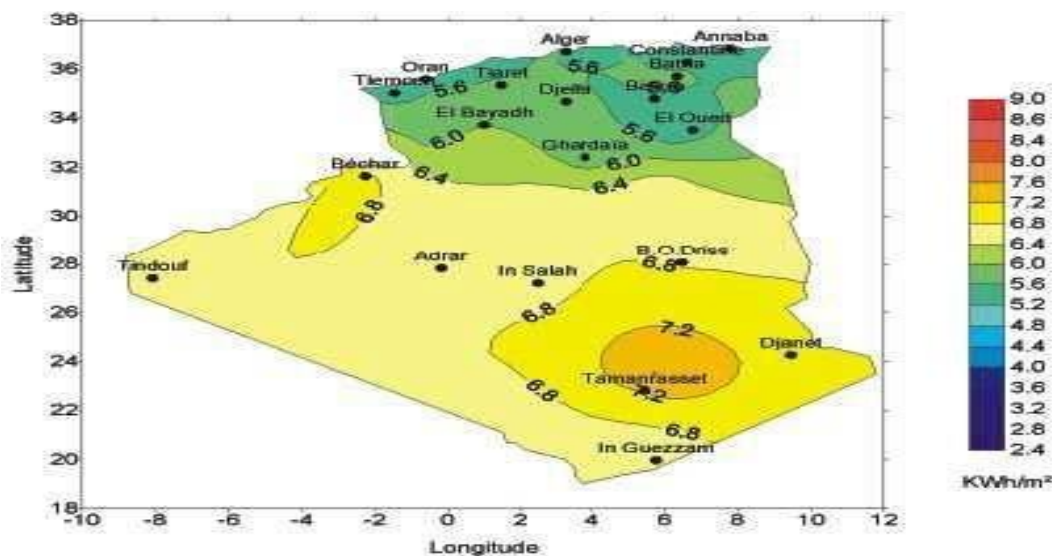
La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire Algérien est représentée dans le Tableau (I-3) selon l'ensoleillement reçu annuellement.

**Tableau (I-3) :** Potentiel solaire en Algérie [5]

Régions	Régions côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie%	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est l'une des plus importantes au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale. La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie (figure 12) [2] :

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques



**Figure (I-12) :** Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné. [2]

Ce gigantesque gisement solaire a donc permis à l'Algérie d'y aller en avant vers une transition énergétique qui va assurer, à long terme, une transformation profonde de la consommation énergétique du pays en devenant de moins en moins dépendant des énergies fossiles, et cela en raison du contexte international qui engage les pays à renforcer leurs politiques environnementales et lutter contre le réchauffement climatique. Et aussi pour faire face à la demande énergétique croissante du pays [8].

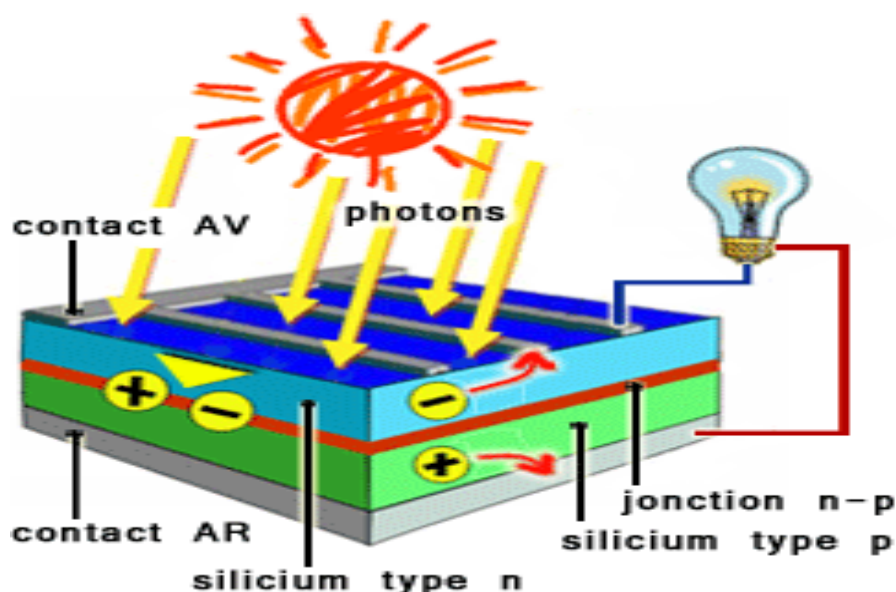
## I.3 La conversion photovoltaïque

### I.3.1 Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par Antoine Becquerel, ce phénomène est basé sur le comportement des matériaux semi-conducteurs lorsqu'ils reçoivent un rayonnement solaire. En effet, lorsque les photons de la lumière du soleil rentrent en contact avec ces matériaux particuliers, ils transmettent leur énergie aux électrons des semi-conducteurs qui génèrent alors une tension électrique figure (I-13).



# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

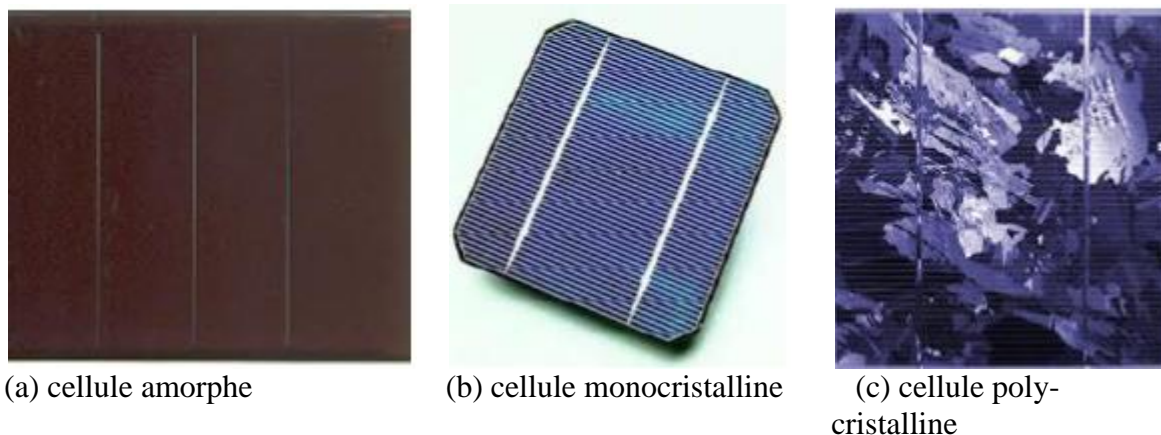


*Figure (I-13) :* Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente. Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure [9].

Il existe plusieurs types de cellules PV, mais les technologies à base de silicium constituent plus de 90% du marché photovoltaïque mondial. On distingue trois catégories des cellules PV fabriquées à partir du silicium figure (I-14) :

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques



**Figure (I-14) :** *Les principaux Types de cellule*

- **Cellules monocristallines :** chaque couche est découpée dans un monocristal de silicium. Ce type de cellule dispose d'un très bon rendement et pouvoir de conversion mais de coût cher.
- **Cellules poly-cristallines :** ce sont des cellules de bon rendement aussi mais légèrement inférieur à celui des cellules monocristallines, ce qui justifie leur coût amoindri.
- **Cellules amorphes :** ce type de cellules ne possèdent pas de structures cristallines. Elles présentent l'avantage d'être intégrées sur des supports souples et rigides. Elles sont souvent utilisées dans des appareils portables, calculatrices, montres, etc.

Récemment, une nouvelle génération de cellules PV est apparue, il s'agit des cellules en couche mince sous formes de films fins, elles possèdent une très grande efficacité de conversion énergétique et un bon rendement. Les cellules à couche mince peuvent être construites sur un substrat flexible.

Les cellules monocristallines et poly-cristallines sont les deux types de cellules PV les plus répandus sur le marché photovoltaïque Tableau (I-4) [10].

**Tableau (I-4) :** *Les principaux types de cellules et leurs rendements* [11]

Technologie	Rendement de la cellule (laboratoire)	Rendement de la cellule (application)	Rendement du module (production)
Mono cristallin	24.7	21.5	16.5
Poly cristallin	20.3	16.5	14.2
Couche mince Amorphe	13	10.5	7.5



# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

## I.3.2 Paramètres photovoltaïques :

Il existe plusieurs paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques qui sont déduits de la caractéristique  $I(V)$  montrée dans la figure (I-15).

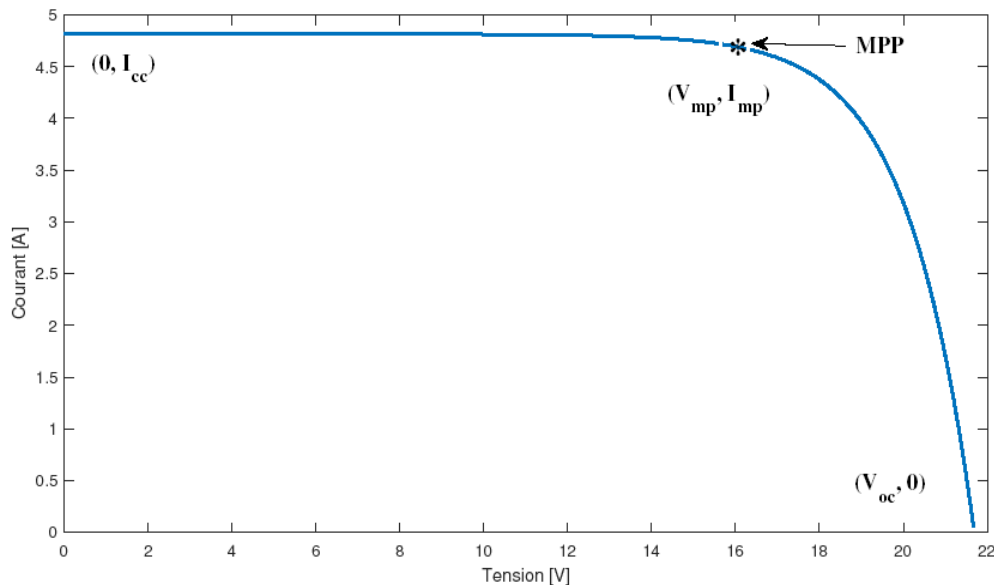


Figure (I-15) : Caractéristique  $I(V)$  d'une cellule photovoltaïque.

- **Courant de court-circuit (I<sub>cc</sub>)** : c'est le courant délivré par un module photovoltaïque en absence de la tension (court-circuit).

$$(V=0), I = -I_{ph} = I_{cc} \quad (\text{I-4})$$

$$I_{cc} = I_{ph} / \left[ 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right] \quad (\text{I-5})$$

Où :

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

$R_s$  : résistance série

$R_{sh}$  : résistance shunt (ou parallèle)

- **Tension de circuit ouvert (V<sub>oc</sub>)** : c'est la tension aux bornes du module photovoltaïque en circuit ouvert.

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{I-6})$$

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

Avec :

$K$  : constante de Boltzmann

$Q$  : charge de l'électron

$T$  : température effective de la cellule

- **Facteur de forme (FF)** : il représente le rapport entre la puissance optimale et la puissance maximale que peut délivrer une cellule.

$$FF = \frac{PM}{I_{cc}V_{co}} = \frac{I_m V_m}{I_{cc} V_{co}} \quad (\text{I-7})$$

Avec :

$PM$  : Puissance maximale.

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme la plus au moins rectangulaire de la caractéristique I-V de la cellule solaire.

- **Rendement  $\eta$**  : c'est le rapport entre la puissance fournie par la cellule et la puissance solaire incidente.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = FF I_{cc} V_{oc} / P_{inc} \quad (\text{I-8})$$

Où :  $P_{inc}$  est la puissance incidente du rayonnement solaire.

- **Puissance maximale (crête  $P_c$ )** : c'est la puissance électrique maximale que peut fournir un module photovoltaïque dans les conditions météorologiques standards de température et d'ensoleillement ( $T=25^\circ\text{C}$  et  $E=1000 \text{ W/m}^2$ ) [10].

## I.3.3 Etat de l'art sur les rendements

La Figure (I-16) représente les records mondiaux de rendement de conversion pour les cellules solaires en fonction des années pour différentes technologies. Les codes couleurs représentent les différentes technologies. En orange, les cellules organiques et pérovskites. En vert, la technologie couche mince (CdTe, CIGS). En bleu, la technologie Si. En violet, les matériaux III-V (colonnes III et V du tableau périodique des éléments). Les tendances des rendements des différentes filières sont notifiées par des traits continus de couleur lavande. Ces tendances permettent d'évaluer l'évolution future des rendements des cellules de chaque technologie. Il est à noter que les évolutions de rendement (qui semblent linéaires) se font particulièrement par sauts technologiques. D'après les limites théoriques de Shockley-Queisser,

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

le silicium et le GaAs peuvent atteindre un rendement de conversion  $\eta$  similaire de 33 %. Or, le rendement du GaAs est aujourd'hui supérieur à celui du silicium. L'explication vient du fait que le GaAs est un matériau à gap direct, contrairement au silicium ; il possède donc une meilleure absorption du spectre solaire. Les cellules multi-jonctions ont une meilleure absorption du spectre solaire que les cellules à une jonction et donc présentent des rendements plus élevés [12].

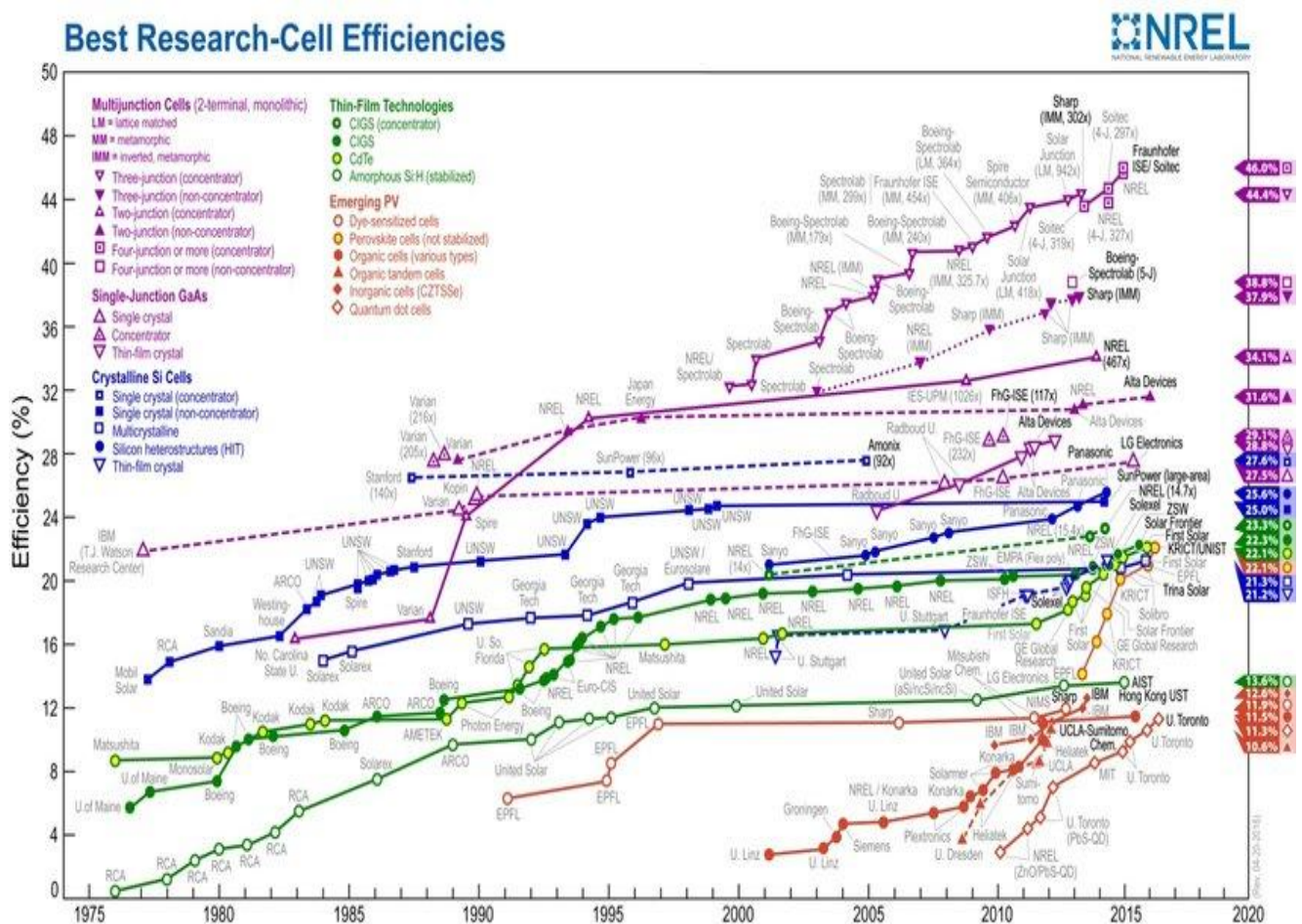


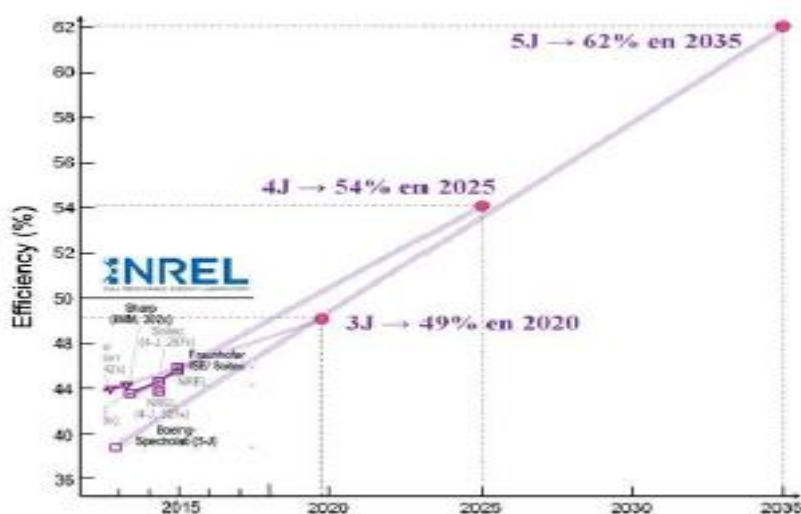
Figure (I-16) : Développement du rendement des cellules photovoltaïques (pour des différents filières)

Sur la Figure, nous pouvons remarquer une évolution globalement linéaire avec des tendances relativement nettes pour toutes les technologies de cellules. Il apparaît que la technologie silicium est quasiment arrivée à maturité et proche de son rendement maximum. Le rendement record de 25,6 % est actuellement détenu par la société Panasonic. Pour les cellules à une jonction avec des matériaux III-V, la progression du rendement dans le temps est un peu plus

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

rapide que celle du Si. La raison en est l'éventail des matériaux et de leurs dopants, qui autorise plus de choix pour trouver un optimum. Pour les cellules à deux jonctions, la croissance des performances est encore plus rapide. Le choix des matériaux a encore augmenté, ainsi que le nombre de couches. L'épaisseur, le dopage et le type de matériau de chaque couche ont une influence. Il y a plus de leviers pour optimiser les cellules à deux jonctions par rapport aux cellules à une seule jonction. Ceci est encore plus vrai pour les cellules triple-jonctions où apparaissent des matériaux ternaires et quaternaires. Pour les cellules à quatre jonctions, seulement deux points sont reportés avec un rendement record détenu par la société Soitec à 46 % pour une concentration de 508 soleils ( $X=508$ ).

A l'heure actuelle, les technologues commencent à avoir un recul suffisant sur les cellules photovoltaïques à concentration, dénommées cellules CPV (de l'anglais : *Concentrator Photovoltaics*), dont les performances croissent très régulièrement contrairement à celles de la filière 'Si' qui ont évolué par sauts technologiques. La figure (I-4) présente la tendance probable des cellules CPV multi-jonctions pour les 20 prochaines années [12].



**Figure (I-17) :** Estimations de l'évolution des rendements pour des cellules multi jonctions au cours des années à venir (source : séminaire de Mathieu Baudrit à Lyon en 2015). Les limites de rendements sont issues de l'article de Yamaguchi [8].

Selon cette prévision, d'ici 2020, le rendement limite serait de 49 % pour des cellules triple-jonctions. En 2025, celui des cellules quadruple-jonctions pourrait être de 54 % et en 2035, de 62 % pour des cellules quintuple-jonctions. La limite semble être la fabrication de cellules à cinq ou six jonctions. La raison principale réside dans la difficulté à récupérer

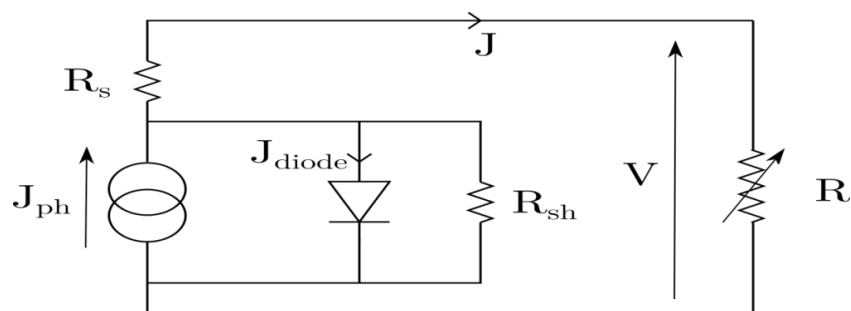
# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

l'ensemble des électrons générés entre chaque jonction ce qui engendrerait plus de problèmes que de solutions.

Notons que ces estimations sont optimistes et que les prévisions du *Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology* donnent des résultats plus bas avec 51% de rendement de conversion atteint d'ici 2035[12].

## I.3.4 Caractéristique électrique sous illumination

Le schéma électrique équivalent d'une diode sous illumination Figure (I-18) est le même que sous obscurité Figure (I-20) mais on y ajoute un courant photo généré  $I_{ph}$  créé par le flux incident de photons [15].



**Figure (I-18) :** Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage. [13]

Dans le cas où les pertes résistives et les courants de fuite dans la cellule sont négligeables, le courant total délivré par la cellule photovoltaïque éclairée, bilan de photo courant et du courant d'obscurité, s'écrit donc sous la forme :  $I(V) = I_{ph} - I_{obs}(V)$

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

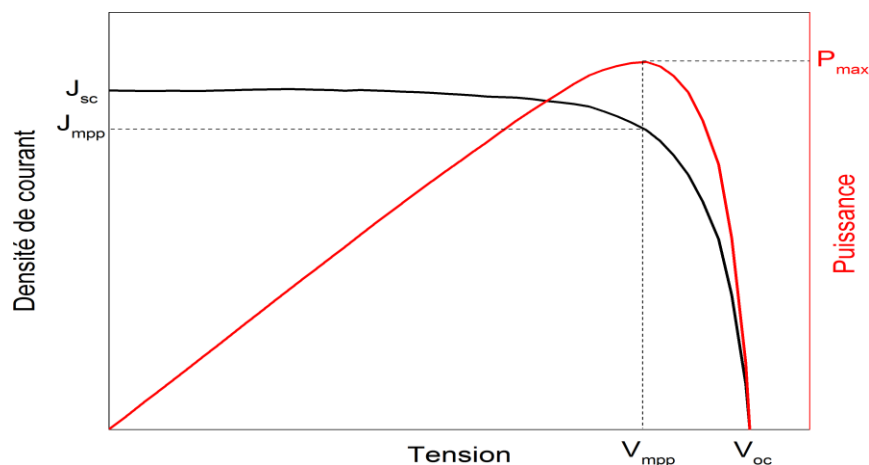


Figure (I-19) : Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque sous éclairage. [13]

## I.3.5 Caractéristique électrique sous obscurité

La caractéristique courant-tension sous obscurité permet de qualifier la qualité de la jonction et d'extraire ses paramètres tels que les résistances apparaissant sur le schéma électrique équivalent présenté sur la figure (I-20). Ce circuit est composé d'une diode représentant la jonction, d'une résistance série  $R_s$ , d'une résistance shunt  $R_{sh}$  en parallèle et de la résistance de charge  $R_{ch}$ . Dans le cas d'une diode idéale, la résistance série est nulle et la résistance shunt infinie.

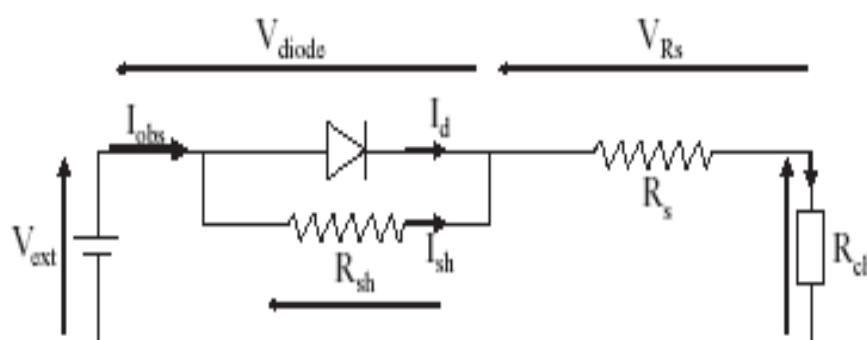


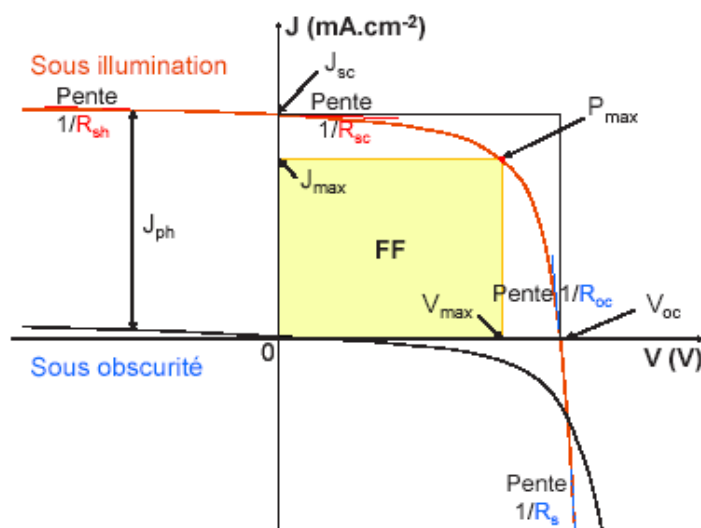
Figure (I-20) : Schéma électrique équivalent d'une diode sous obscurité [12].

Les caractéristiques  $I(V)$  de la photodiode sont représentées sur la figure (I-21). Par convention, la valeur du courant photogénéré est déclarée positive. L'allure de la courbe est tracée en mode générateur. La zone rectangulaire en jaune sur la figure (I-21) représente la

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

puissance utile (puissance maximale de sortie) de la cellule photovoltaïque. Le point de fonctionnement de la cellule  $P_{max}$  est fixé par le courant demandé par la charge, autrement dit par l'impédance de cette charge.  $P_{max}$  est le produit maximal de la tension et de la densité de courant.

Comme expliqué précédemment, l'extraction des résistances série  $R_{set}$  shunt  $R_{sh}$  se fait à partir des tangentes (lignes pointillées bleue et rouge respectivement) représentées sur la Figure(I-5) . Il est également possible d'extraire les résistances en circuit ouvert  $R_{oc}$  et de court-circuit  $R_{sc}$  des tangentes tracées en lignes continues [12].



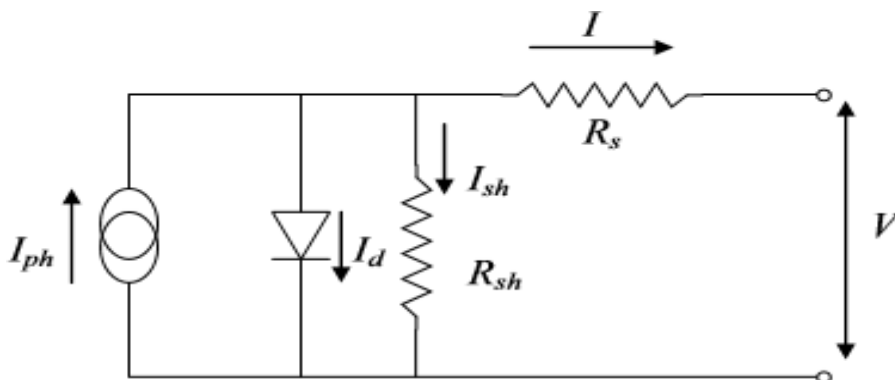
**Figure (I-21) :** Caractéristique  $I(V)$  typique d'une cellule photovoltaïque sous obscurité (courbe noire) et sous illumination (courbe orange) en mode générateur [12].

## I.3.6 Circuits électriques équivalent d'une cellule photovoltaïque

### I.3.6.1 Modèle à une diode

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle standard pour une diode. Il est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle. Ce modèle comprend une diode.

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques



**Figure (I-22) :** Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode [9].

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation :

$$I = -I_{ph} + \frac{V - R_s I}{R_{sh}} + I_s \left[ \exp\left(\frac{q(V - R_s I)}{AKT}\right) - 1 \right] \quad (\text{I-9})$$

Avec :

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

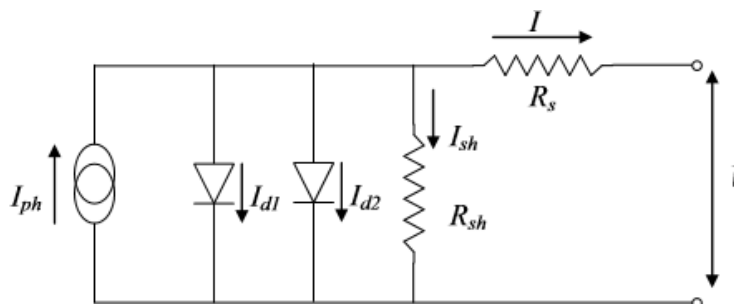
$A$  : facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2

$I$  : courant fourni par la cellule.

$V$  : tension a la borne de la cellule[v]

### I.3.6.2 Modèle à deux diodes

Le circuit équivalent du modèle à deux diodes est le plus proche du comportement réel de la cellule solaire, du fait qu'il tient compte du mécanisme de transport des charges électriques à l'intérieur de la cellule (deux diodes). Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part sur la surface du matériau et d'autre part sur le volume du matériau.



**Figure (I-23) :** Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes. [9]

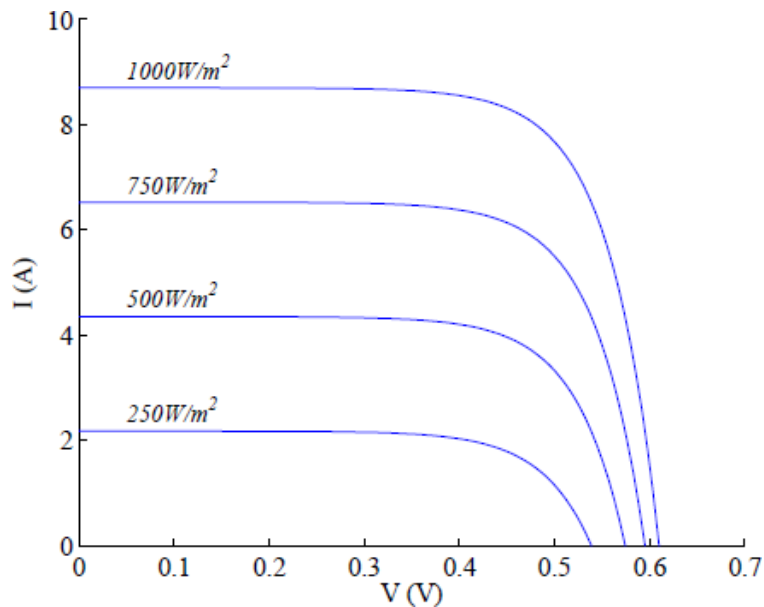


# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

$$I = -I_{ph} + \frac{V - R_s I}{R_{sh}} + I_{s1} \left[ \exp\left(\frac{q(V - R_s I)}{AKT}\right) - 1 \right] + I_{s2} \left[ \exp\left(\frac{q(V - R_s I)}{AKT}\right) - 1 \right] \quad (\text{I-10})$$

- **L'effet de l'éclairement sur les caractéristiques I-V :**

Le courant débité par une cellule dépend fortement du niveau d'éclairement. On constate expérimentalement que le courant de court-circuit est directement proportionnel à l'éclairement. Quant à la tension, celle-ci est peu sensible aux variations du niveau d'éclairement. Sur l'exemple ci-contre, lorsque le niveau d'éclairement est divisé par 2 (il passe de 1000 w/m<sup>2</sup> à 500w/m<sup>2</sup>), on constate que le courant de court-circuit I<sub>cc</sub> est aussi divisé par 2 (il passe de 5A à 2.5 A) et la tension en circuit ouvert V<sub>co</sub> diminue de 4%



**Figure (I-24) :** caractéristique I-V selon différents niveaux d'éclairement

- **L'effet de la température sur la caractéristique I-V :**

On observe que le courant reste constant mais la tension diminuée avec l'augmentation de la température donc la température influe sur la valeur de la tension.

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

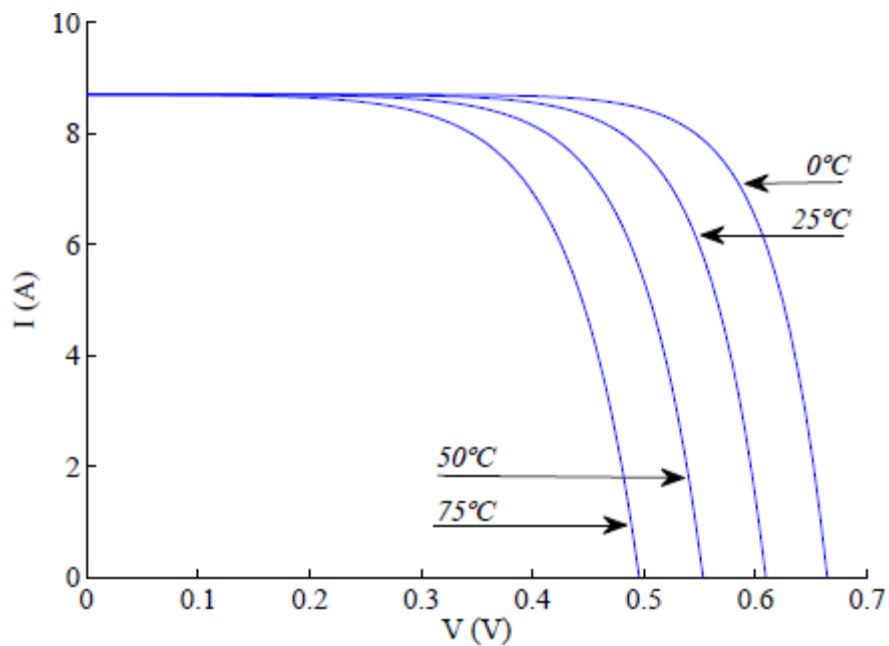


Figure (I-25) : Caractéristique I-V selon différentes plages de température

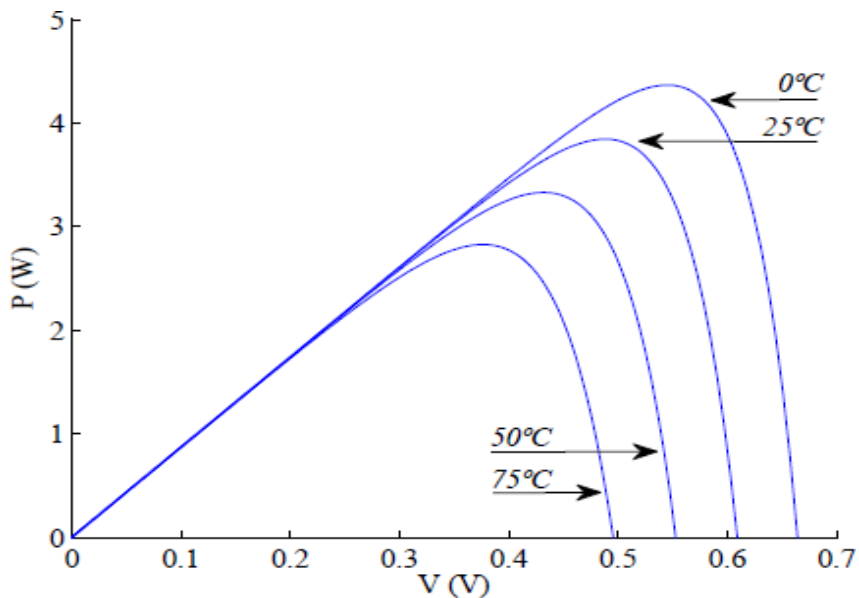


Figure (I-26) : Caractéristique I-V selon différentes plages de température.

On observe que le point de puissance maximal change avec la température lorsque la température augmente, le point de puissance maximal diminue aussi que la tension.

# Chapitre I : Gisement solaire et cellules photovoltaïques

## I.4 Conclusion

La première partie de ce chapitre présente des notions essentielles sur le gisement solaire à savoir les coordonnées terrestres, le mouvement du soleil, différentes composantes du rayonnement solaire et autres. L'irradiation solaire dépend de plusieurs facteurs tels que l'ensoleillement, la température, le lieu géographique, l'instant considéré dans la journée, et la nature des couches nuageuses. De nombreux travaux de recherche ont été développés sur l'estimation de l'irradiation solaire au sol pour faire le dimensionnement d'une installation solaire et prédire le rayonnement solaire, la connaissance du potentiel solaire pour faire des installations solaires thermiques du chauffage ou pour la production l'électricité oblige la meilleur mesure des différents paramètres de l'irradiation, nous présenterons dans le prochain chapitre les divers appareils et instruments nécessaires pour réaliser les différentes mesures.

Dans la seconde partie, nous avons la conversion photovoltaïque, son principe et les paramètres permettant de caractériser ses performances. Nous avons aussi discuté de l'état de l'art de cette filière tout en insistant sur les diverses technologies actuelles et futures. Les courbes caractéristiques, IV, ont aussi été introduites et discutées succinctement.

**Chapitre II :**  
**Le photovoltaïque à**  
**concentration**

### II.1 Introduction

L'augmentation brutale du prix du pétrole survenu en 1973 a conduit une première fois l'homme à s'intéresser à des sources d'énergie renouvelables au premier rang desquelles l'énergie solaire. Les principales caractéristiques de l'énergie solaire ayant suscité l'intérêt qu'on lui a porté à l'époque étaient sa gratuité, sa disponibilité sur une grande partie du globe terrestre et l'absence de risque d'épuisement connu par les sources d'énergie fossile. Aussi le monde connaît depuis plus d'un siècle un important développement économique. Le développement industriel, l'augmentation du parc automobile et la multiplication des équipements domestiques ont provoqué une croissance importante de la demande énergétique.

Comme alternative à ces préoccupations, le développement et l'implémentation des énergies renouvelables est incontournable. Des ressources énergétiques illimitées et abondamment disponibles existent et doivent être exploitées. Certaines, comme l'énergie éolienne ou hydraulique connaissent déjà un développement technique et commercial important et sont économiquement compétitives.

D'autres, comme l'énergie solaire et thermoélectrique, sont techniquement disponibles, mais leur compétitivité nécessite une plus grande confiance de la part des entreprises privées et des institutions publiques afin de favoriser l'implémentation de ce type de systèmes et de favoriser une diminution des coûts par les économies d'échelle. Deux filières possibles existent pour réaliser la conversion d'énergie solaire en électricité : le recours à des cellules photovoltaïques, ou la conversion thermodynamique. [14]

### II.2 Aperçue sur la concentration photovoltaïque

Le CPV est une technologie photovoltaïque à haut rendement. Elle utilise la concentration du soleil pour augmenter l'éclairement sur des cellules haute efficacité qui peuvent comporter une ou plusieurs jonctions. Nous parlerons de cellules simple-jonction (1J) et multi jonctions (MJ). L'augmentation de l'intensité sur les cellules a pour effet d'augmenter leur rendement. L'utilisation d'optiques de concentration permet de rentabiliser l'utilisation de cellules haute efficacité en minimisant la surface active nécessaire pour une surface de captation donnée. Le système optique impose au module de suivre la course du soleil au moyen d'un tracker. Nous détaillerons plus loin dans ce chapitre l'architecture d'un module CPV. L'enjeu du CPV est de proposer une technologie compétitive de module avec un rendement supérieur à

celui du PV. Les rendements des modules CPV installés aujourd'hui sont d'environ 30%. Le photovoltaïque à concentration se positionne comme un concurrent direct du PV sur le marché des centrales solaires. [15]

### II.3 Etat de l'art du CPV

Le CPV se positionne aujourd'hui clairement sur le marché des grandes centrales de production d'électricité. La puissance installée cumulée mondiale atteint 360MW, ce qui représente 0,1% de la puissance photovoltaïque installée. Le CPV a connu un essor dans les années 2010 durant lesquelles les pays ont conduit des politiques fortes de recherche et développement mais aussi d'innovation dans l'énergie photovoltaïque (II-1). Cependant on note une diminution importante des installations dans les cinq dernières années avec un retour en 2015 de la situation de 2011 en termes de puissance installée annuelle.

Cette tendance s'explique par une compétition forte avec l'industrie du PV qui a réussi dans les dernières années à réduire drastiquement le prix des modules PV. Le CPV conserve malgré tout le potentiel d'atteindre des rendements de conversion au-dessus de 40% en utilisant des cellules multi jonctions onéreuses mais rentabilisées grâce à la concentration optique [16].

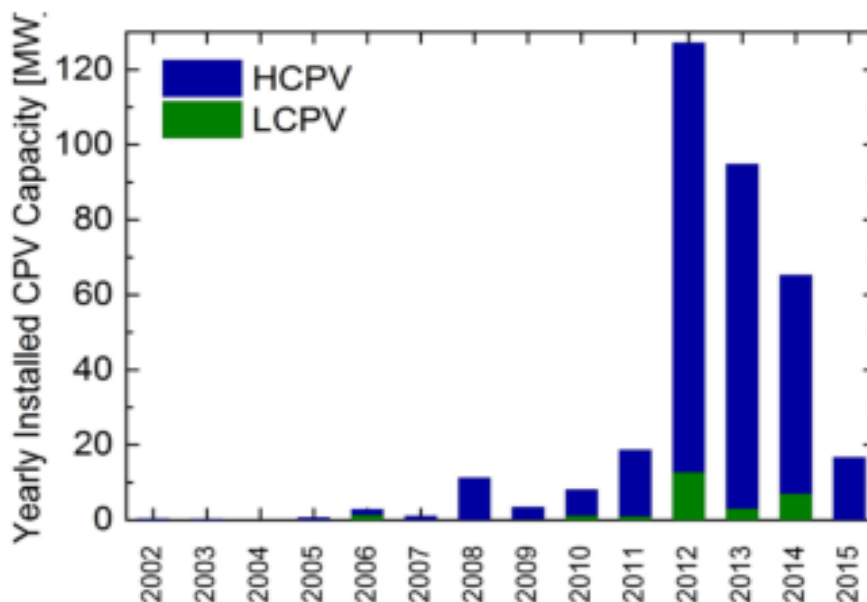


Figure (II- 1) : Capacité installée annuelle pour le CPV

### II.3.1 Types de concentrateurs solaires

Les systèmes à concentration se décomposent en deux grandes familles selon la valeur de la concentration  $X$  ; les modules dits HCPV, à haute concentration, de 100X à 1000X voir 1500X et les modules à faible concentration (LCPV) avec des coefficients de concentration inférieurs à 100X. Plus de 90% des installations utilisent actuellement des systèmes HCPV intégrant des cellules MJ de petites dimensions et utilisant des trackers à deux axes figure (II-2). La plupart des modules LCPV se contentent de trackers à un seul axe. La figure présente deux centrales CPV de technologies différentes ; à gauche la centrale de Golmud en Chine de 60MW installée en 2012, et à droite, un central prototype de 500kW montée à Tenerife dans les années 90. Les modules HCPV de Suncore sont utilisés à Golmud alors qu'un système LCPV nommé EUCLIDES est installé sur la centrale de Tenerife.



**Figure (II- 2) :** Deux technologies de modules CPV en centrale ; à gauche les modules HCPV Suncore sur la centrale de Golmud en Chine (60MW) et à droite le système LCPV EUCLIDES sur La central prototype de Tenerife en Espagne (500kW). [15]

Dans la pratique, deux types de systèmes optiques sont utilisées dans les CPV. Les systèmes optiques à réfraction utilisant des miroirs de Fresnel et les systèmes à réflexion utilisant des miroirs paraboloidaux.

#### ➤ Systèmes à réflexion :

- **Le miroir de Fresnel**

Basés sur la même technologie que les lentilles de Fresnel, les miroirs permettent de mettre à plat une parabole en la « découpant » en plusieurs tronçons. L'espace occupé est donc restreint comparé à une parabole classique et la prise au vent se voit réduite puisque chaque mouvement de miroir est contrôlé par des moteurs.

On peut donc orienter les miroirs pour réguler la concentration (ex : enlever ou rajouter la focalisation d'un miroir), ou passer en position sécurité en les positionnant à plats (en cas de vent violent).

Les rendements sont inférieurs aux réflecteurs de types paraboliques mais l'industrialisation de ce procédé est nettement plus accessible, moins onéreuse et facile à l'installation. De plus, cette technologie est largement répandue dans la concentration solaire thermique donc les processus d'industrialisation sont déjà développés.



**Figure (II- 3) :** *Système Greenfield*

La société Greenfield Solar (une startup américaine de Cleveland) utilise la technologie des miroirs de Fresnel pour concentrer les rayons incidents figure (II-3).

Ces miroirs forme parabolique sont fixes et pré-orientés. La concentration maximum est de 900 « soleils ».

- **Le miroir parabolique**

Avec ce type de technologie, la parabole réfléchit les rayons du soleil sur une cellule photovoltaïque pour produire de l'électricité. Cette technologie est aussi largement utilisée dans la concentration à but thermique tel que les paraboles de type « dish/Stirling ».





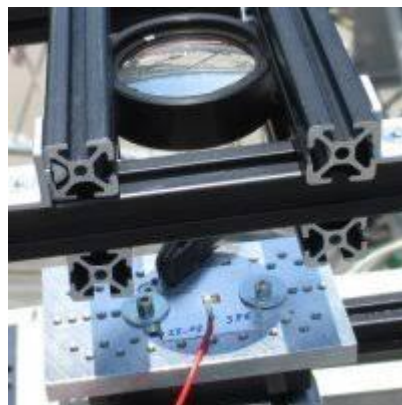
**Figure (II- 4) :** *Miroirs paraboliques*

L'entreprise Solartron Solar, utilise des paraboles montées sur des traqueurs solaires qui réfléchissent la lumière du soleil sur des cellules photovoltaïques. Cette entreprise propose deux types d'utilisation de son produit, soit pour la haute concentration à but photovoltaïque, soit pour la production d'une source thermique. [17]

### ➤ **Systemes à réfraction**

- **Les lentilles**

La loupe est une lentille optique qui est devenue un objet courant de nos sociétés voir la figure (II-5). Elle sert à l'agrandissement visuel d'une copie ou, quand elle est utilisée dans une fonction plus pyromane, à concentrer le rayon solaire sur un objet pour le faire brûler. Les lentilles, sont utilisées dans de nombreuses applications optiques, telle que le microscope ou le phare marin.



**Figure (II- 5) :** *Loupe optique.*

- Les lentilles de Fresnel

L'optique connaît un tournant au début du 19<sup>ème</sup> siècle avec Augustin Fresnel qui donne son nom à son invention : « La lentille de Fresnel ». Ce type de lentille a permis de réduire considérablement l'épaisseur du verre en reproduisant le schéma d'une lentille de taille normale sur différents échelons. La figure (II-6) montre le principe de fonctionnement d'une cellule CPV utilisant une lentille de Fresnel.

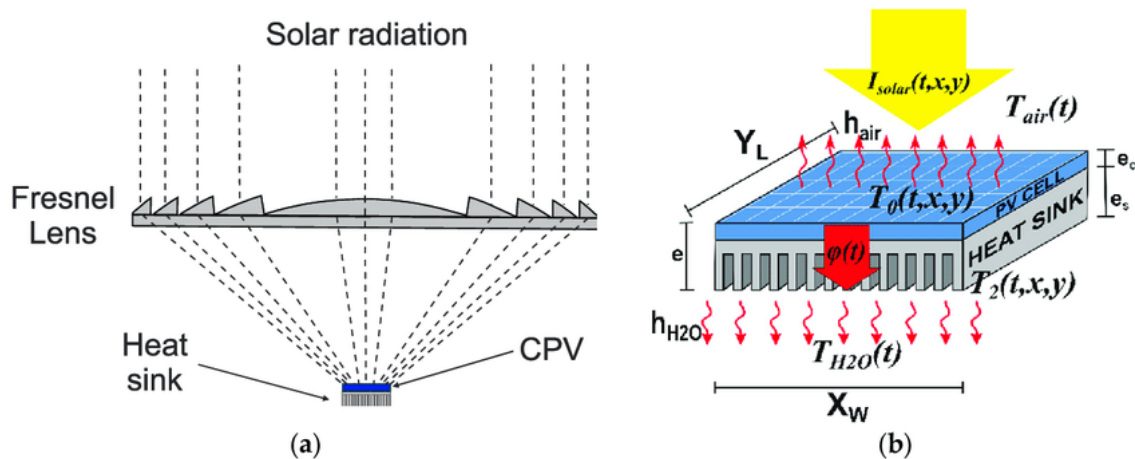


Figure (II- 6) : Fonctionnement d'une cellule sous lentille de Fresnel. [17]

## II.4 Modélisation du concentrateur

Dans le cadre de notre travail, nous avons optée pour configuration utilisant une parabole de télécommunication de type offset tapissée d'un film réflecteur et posée sur une structure métallique robuste permettant le suivie de la trajectoire du soleil en altitude et en azimut. La poursuite du soleil peut être manuelle ou automatique. Au foyer du concentrateur, nous avons placée quatre cellules au silicium monocristallin branchées en série pour caractérisation en conditions réelles de fonctionnement.

### II.4.1 Considérations géométriques

- Définition

Une parabole est l'ensemble des points situés à égale distance d'une droite fixe(D) appelée directrice, et un point fixe (F) appelé foyer. L'intersection de la parabole et de son axe est le sommet (V) qui est exactement intermédiaire entre le foyer et la directrice figure (II-7).

[18]

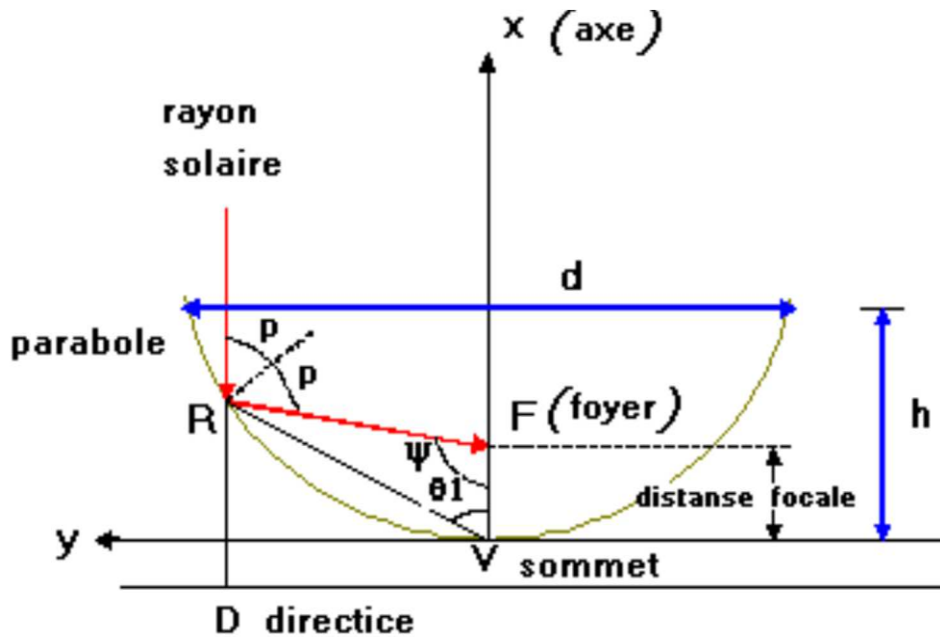


Figure (II- 7) : Propriétés géométriques de la parabole

Si l'origine est prise au sommet (V) et l'axe des abscisses le long de l'axe de la parabole, L'équation de la parabole est :

$$Y^2 = 4. f. x \quad (\text{II-1})$$

F : la distance focale FV

Lorsque l'origine est décalée vers le foyer(F) comme on le fait souvent dans les études optiques, et le sommet est à la gauche de l'origine, l'équation d'une parabole devient :

$$Y^2 = 4f(x + f) \quad (\text{II-2})$$

Souvent, dans les études solaires, il est plus utile de définir la courbe parabolique à l'aide de la distance focale (f) et en fonction de l'angle (ψ).

L'angle(ψ) est mesuré à partir de la ligne (VF) et le rayon parabolique P qui représente la distance (RF) entre le foyer F de la courbe de la parabole.

$$P = \frac{2.f}{1+\cos\psi} \quad (\text{II-3})$$

P : rayon parabolique, distance (RF) entre la courbe de la parabole et le foyer f.

ψ : angle mesuré à partir de la ligne (VF) et le rayon parabolique (P).

• Angle d'ouverture d'une parabole

Cette Angle d'ouverture d'une parabole est définie par :

$$\text{tang}\psi_p = \frac{\left(\frac{f}{d}\right)}{2\left(\frac{f}{d}\right)^2 - 1/8} \quad (\text{II-4})$$

$F$  : distance focale

$D$  : diamètre de l'ouverture de la parabole

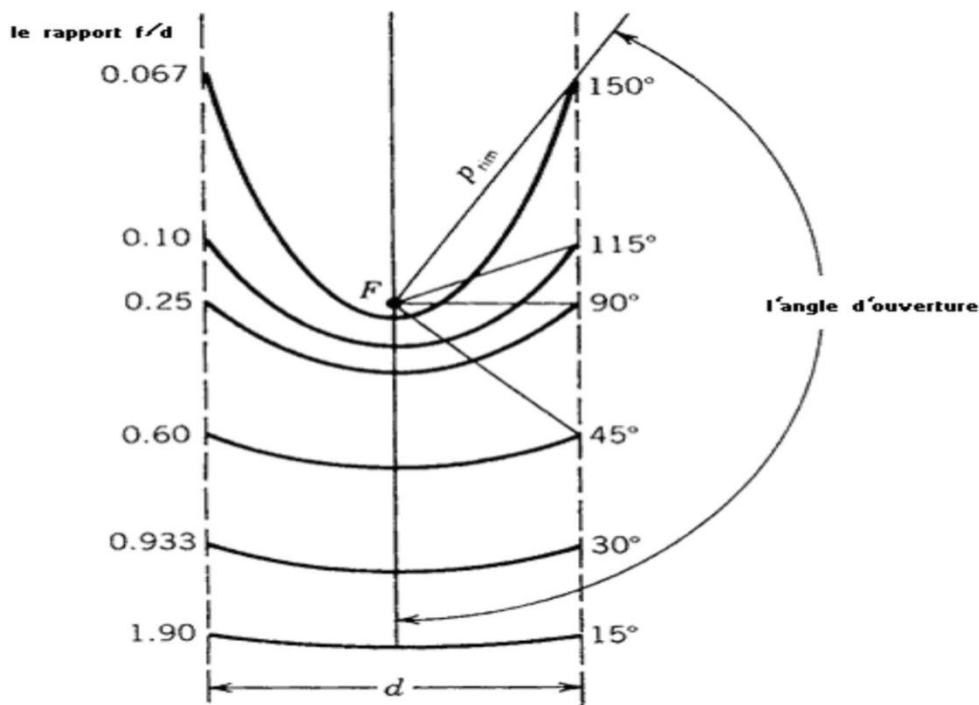


Figure (II- 8) : Section d'une parabole possédant un foyer commun  $F$  et le même diamètre d'ouverture.

On peut voir qu'une parabole avec un petit angle d'ouverture est relativement plate figure (II-8) L'augmentation de l'angle d'ouverture de la parabole fait diminuer la distance focale. [19]

• Taille de la parabole :

La taille de la courbe parabolique  $h$  peut être définie comme la distance maximale du sommet à une ligne tracée à travers l'ouverture de la parabole, elle est définie par :

$$h = \frac{d^2}{16f} \quad (\text{II-5})$$

De façon semblable, l'angle d'ouverture peut être trouvé en fonction des dimensions d'une parabole :

$$\tan \psi_p = \frac{1}{\left(\frac{d}{8h}\right) - \left(\frac{2h}{d}\right)} \quad (\text{II-6})$$

- **Surface de la parabole**

C'est l'espace incluse entre une parabole et une ligne à travers son ouverture, elle est indiquée par :

$$Ax = \frac{2}{3} \cdot d \cdot h \quad (\text{II-7})$$

La surface d'ouverture d'un paraboloïde est donnée par :

$$Aa = \frac{d^2 \pi}{4} \quad (\text{II-8})$$

- **Longueur de la parabole :**

La longueur d'arc d'une parabole peut être trouvée en intégrant une surface différentielle de cette courbe (l'équation), en appliquant les limites  $X=h$  et  $Y=d/2$  comme décrit sur l'équation (II-9), on trouve : [20]

$$s = \frac{d}{2} \sqrt{\left[\frac{4h}{d}\right]^2} + 2 \operatorname{fln} \sqrt{\left[\frac{4h}{d}\right]^2} + 1 \quad (\text{II-9})$$

- **Système optique d'une surface parabolique**

L'idée d'utiliser une surface parabolique vient du fait qu'elle est stigmatique pour les points à l'infini situé sur son axe. D'après les lois de réflexion, tout rayon lumineux parallèle à l'axe de la parabole est réfléchi par la parabole suivant une droite passant par le foyer. Donc la parabole focalise tous les rayons réfléchis en un point appelé <foyer> figure (II- 6).

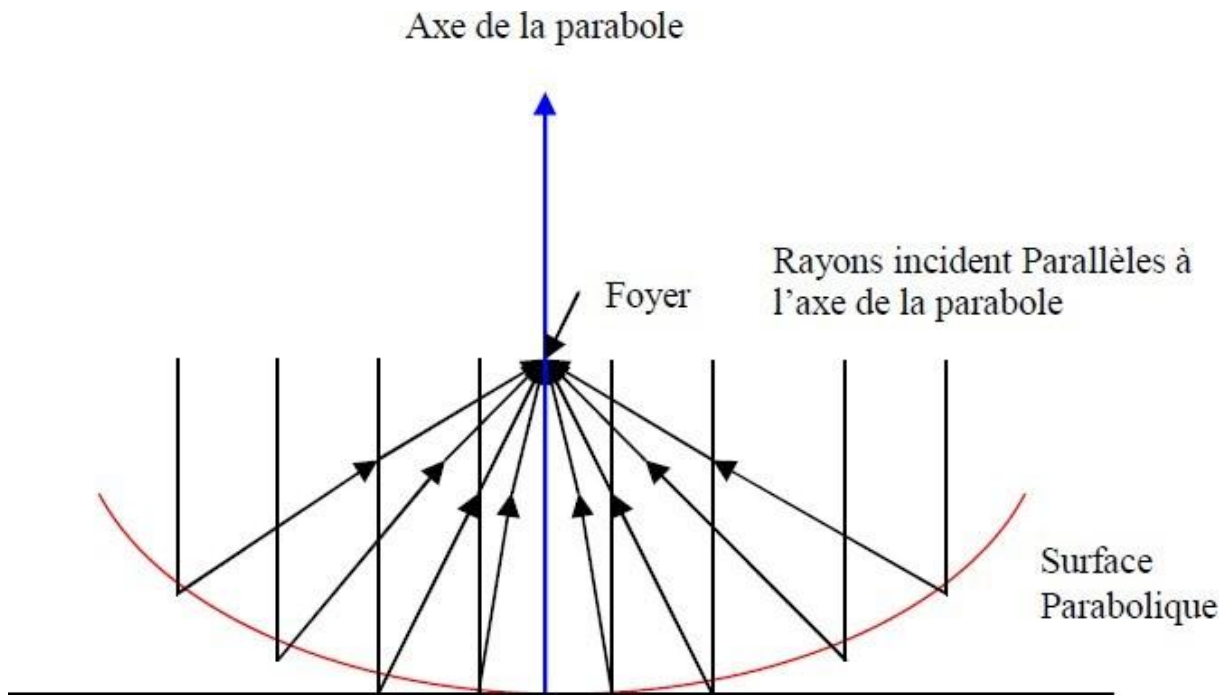


Figure (II- 9) : Système optique d'une surface parabolique

- Cas de la parabole offset

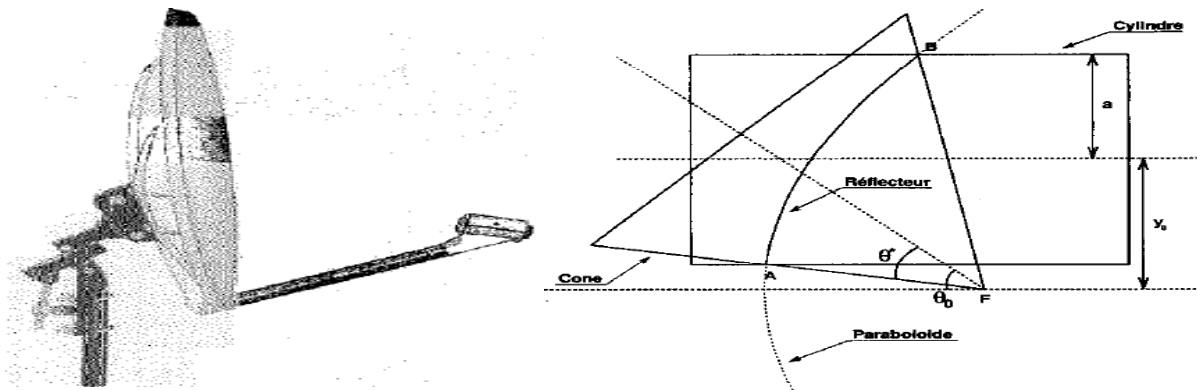


Figure (II- 10) : Les deux façons de définir le foyer dans un paraboloïde offset (vue de profil). [21]

Les caractéristiques géométriques de la parabole offset sont données par :

- $f = \frac{a^2}{4s} * \left(\frac{a}{b}\right) = \frac{D^2}{16s} * \left(\frac{D}{2b}\right)$  (II-10)

- $r_{max} = f + \frac{(y_0 + a)^2}{4f}$  (II-11)

- $r_{min} = \frac{(y_0 - a)^2}{4f}$  (II-12)

- $y_0 = 2f\sqrt{\left(\frac{b}{a}\right)^2} - 1$  (II-13)

- $y_0 = 2f\sqrt{\left(\frac{b}{a}\right)^2} - 1$  (II-14)

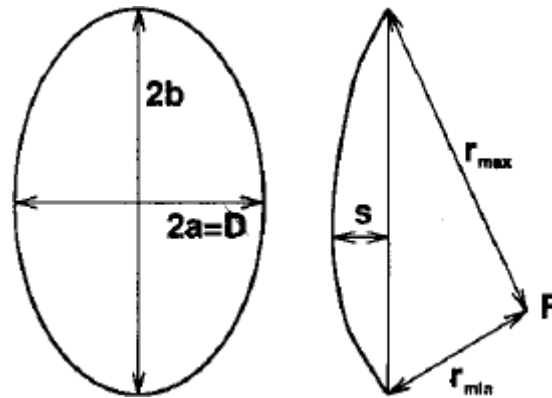


Figure (II- 11) : Dimensions d'un réflecteur offset.

- La surface d'ouverture d'un paraboloïde offset est :

$$A_a = a * b * \pi \quad (II-14)$$

## II.5 Caractéristiques des optiques à concentration :

### II.5.1 2.4.1 La concentration :

Ce paramètre indique la quantité de concentration d'énergie réalisée par un collecteur donné. Il existe deux définitions de la concentration solaire qui sont la concentration géométrique et la concentration ponctuelle (distribution du flux).

- **Concentration géométrique**

C'est le rapport de la surface de l'ouverture du collecteur  $A_a$  à celle du récepteur  $A_r$ .

$$C_g = \frac{A_a}{A_r} \quad (II-15)$$

- **Concentration ponctuelle**

Elle est égale au rapport de l'éclairement moyen sur la surface de l'absorbeur à l'éclairement de l'ouverture. [22]

$$C_0 = \frac{I_r}{I_a} \quad (II-16)$$

$I_r$  : L'énergie reçue à l'ouverture du récepteur.

$I_a$  : L'énergie reçue à l'ouverture d'un paraboloïde.

### II.5.2 Efficacité du concentrateur

La mesure des performances d'un collecteur solaire est une étape importante et nécessaire pour la compréhension du fonctionnement du système.

Cette efficacité se définit comme le rapport de l'énergie thermique absorbée par le récepteur à l'énergie reçue à l'ouverture du concentrateur.

$$h = \frac{Q}{IA} \quad (\text{II-17})$$

Le rendement atteint par le concentrateur dépend de l'intensité du rayonnement et de la différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant et dépende de la surface du réflecteur comme aussi dépende du type de parabole utilisé. [22]

### II.5.3 L'importance de la concentration solaire

Le tableau résume les avantages et les désavantages des systèmes à concentration.

**Tableau (II- 1) : les avantages et les inconvénients des systèmes à concentration [19]**

Avantages	Désavantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Réduction des surfaces réfléchissantes.</b></li> <li>- <b>Réduction des pertes thermiques.</b></li> <li>- <b>La densité d'énergie au niveau de l'absorbeur est grande donc le fluide température plus élevée pour la même surface de captation d'énergie.</b></li> <li>- <b>Les systèmes à concentration peuvent être utilisés pour la production d'énergie électrique.</b></li> <li>- <b>Le stockage est plus faible pour des systèmes à concentrateurs</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le rayonnement diffus est très mal utilisé dans les systèmes à forte concentration, seul le rayonnement direct est concentré.</li> <li>- Les concentrateurs nécessitent un système de poursuite du soleil qui va augmenter le coût du système à installer.</li> <li>- Le pouvoir réflecteur des miroirs décroît dans le temps et il faut les réargenter ou le repolir.</li> <li>- L'absorbeur est soumis à de grandes variations de température lors des passages nuageux.</li> </ul>



## II.6 Caractéristiques électriques des systèmes à concentration photovoltaïque

La modélisation du comportement électrique est la tâche la plus importante pour décrire de manière analytique précise le mécanisme physique de cellule photovoltaïques soumises à concentration visé à vis des changements climatiques de température et d'éclairement.

Deux paramètres caractérisant le comportement électrique des cellules soumises à concentration méritent d'être cités ici. Il s'agit notamment de la puissance maximale de fonctionnement et de la température de la cellule.

Almonacid et al. ont présenté une formule simple pour calculer la température de la cellule en fonction de  $T_{amb}$ ,  $DNI$  et  $W_s$  :

$$T_{cell} = T_{amb} + a_1 DNI + a_2 W_s \quad (\text{II-18})$$

Les coefficients  $a_1$  et  $a_2$  sont évalués par régression. La méthode donne une meilleure estimation pour des  $DNI$  élevés. Pour des  $DNI < 400 \text{ W/m}^2$ , l'erreur relative est 4,8 % et descend à 0,17 % pour des  $DNI > 400 \text{ W/m}^2$ .

Pour le calcul de la puissance maximale, nous retenons l'expression proposée par le Standard ASTM E2527 qui prédit la puissance maximale de cellule sous concentration en utilisant l'équation suivante :

$$P_{ASTM} = DNI (A_1 + A_2 DNI + A_3 T_{amb} + A_4 W_s) \quad (\text{II-19})$$

Où les coefficients  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  et  $A_4$  sont estimés au moyen d'analyse de régression à partir des données mesurées en extérieur et  $W_s$  est la vitesse du vent en m/s. [23]

## II.7 Caractéristiques du récepteur

Le récepteur intègre les cellules photovoltaïques, quatre cellules monocristallines sur support métallique dans notre cas. Le récepteur a également un rôle de diffuseur thermique afin d'éliminer les échauffements localisés au voisinage de la cellule dus au flux lumineux concentré. Le récepteur est monté sur un dissipateur thermique, qui peut être passif ou actif afin de limiter l'échauffement de la cellule. En effet l'échauffement de la cellule provoque une chute de ses performances, notamment de sa tension de circuit ouvert. Les systèmes dits actifs utilisent une source extérieure d'énergie pour fonctionner et sont généralement plus complexes que les systèmes passifs. Les systèmes de refroidissement passifs ont l'avantage de ne pas réduire la quantité nette d'électricité produite par l'ensemble de l'installation. Cependant, ces systèmes ont généralement des capacités de refroidissements moindres que les systèmes actifs.

Certains auteurs estiment que les systèmes de refroidissement passifs peuvent être utilisés pour des cellules non groupées allant jusqu'à une concentration de 1000X.

### **II.8 Conclusion**

Au cours de ce deuxième chapitre nous avons fait un aperçu sur la concentration photovoltaïque, son principe et les systèmes existants et nous avons procédé à l'analyse de la littérature spécifique à notre étude. Ainsi nous avons introduits la parabole offset et défini les paramètres essentiels permettant la caractérisation optique et électrique de tel système.

# **Chapitre III :**

## **Conception et réalisation**

### III.2 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les différentes étapes de la réalisation du concentrateur solaire parabolique de type offset. Nous avons choisi ce type parce qu'il est disponible et aussi il évite l'effet d'ombre sur le réflecteur.

Notre prototype a été réalisé au niveau du département des énergies renouvelables à l'Université de Blida. Sachant que les essais ont été faits au niveau de la faculté, le concentrateur a été placé dans un terrain ouvert afin de capté le maximum de rayonnement pour avoir des résultats fiables.



**Figure (III – 1) : vue générale du prototype**

- **Les coordonne de Blida :**

Latitude : 36°28'12" Nord

Longitude : 2°49'39" Est

L'altitude par rapport au niveau de la mer : 256 m

### III.3 Description des différentes parties du prototype

Le banc d'essais est composé d'une parabole offset tapissée d'un film hautement réfléchissant où sont placées des cellules solaires monocristallines en son foyer.

#### III.3.1 Le réflecteur :

Il s'agit d'une ancienne parabole de type récepteur satellitaire couverte en première couche d'un papier glacé afin de lisser l'état de sa surface (supprimer la rugosité de surface), ensuite un film réflecteur auto collant en aluminium couvre la surface de la parabole formant ainsi un réflecteur. Le film aluminium devrait avoir son côté brillant face au soleil.

Pour éviter les imperfections optiques sur la surface brillante on a coupé le film en petits bandes avant les collés. La figure (III -2) montre les étapes de réalisation :



**Figure (III -2) :** *les étapes de réalisation du réflecteur*

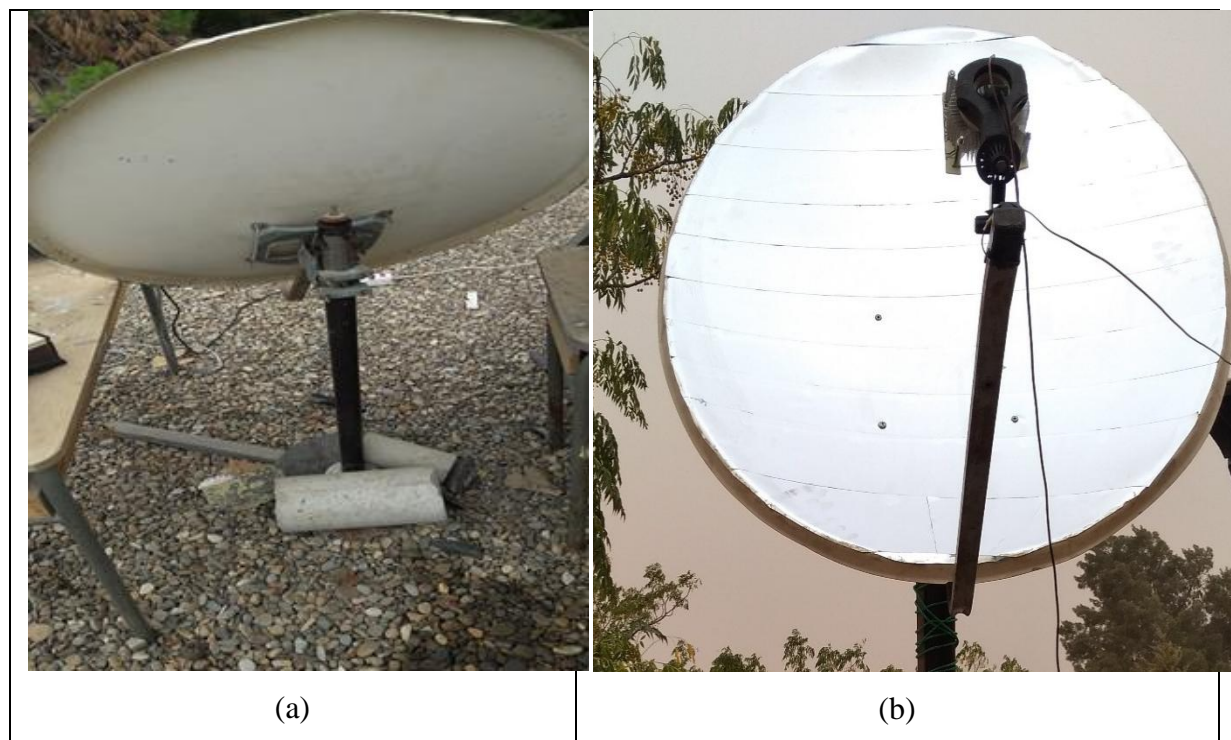
Le réflecteur aluminium est de type Mylar avec un coefficient de réflexion supérieur à 0,85. Deux paramètres doivent être choisis pour décrire entièrement un concentrateur parabolique :

Le diamètre et la distance focale. Il est évident que plus le diamètre de la parabole grand ; plus le flux solaire capté est grand, et donc plus l'énergie concentrée au foyer sera importante. Les caractéristiques géométriques de la parabole sont données dans le tableau suivant :

**Tableau (III -1) :** *Caractéristiques géométrique du réflecteur*

Caractéristiques géométriques de réflecteur	
Diamètre	D=1.81m
La taille	H=0.26m
Distance focale	F=0.78m
Surface d'ouverture	$A_a=2.57m^2$

Une fois que la parabole est réalisée, il faut construire une monture sur laquelle celle-ci va se poser figure (III -3).



**Figure (III -3) :** *a) Vue arrière du prototype , b) vue de face de la parabole avant le début de l'expérience*

**III.3.2 Description du récepteur**

La connexion en parallèle de quatre cellules élémentaires augmente la tension et l'intensité pour produire plus de puissance. Ces cellules sont placées sur un dissipateur de chaleur protégées par la surface avant d'un verre.

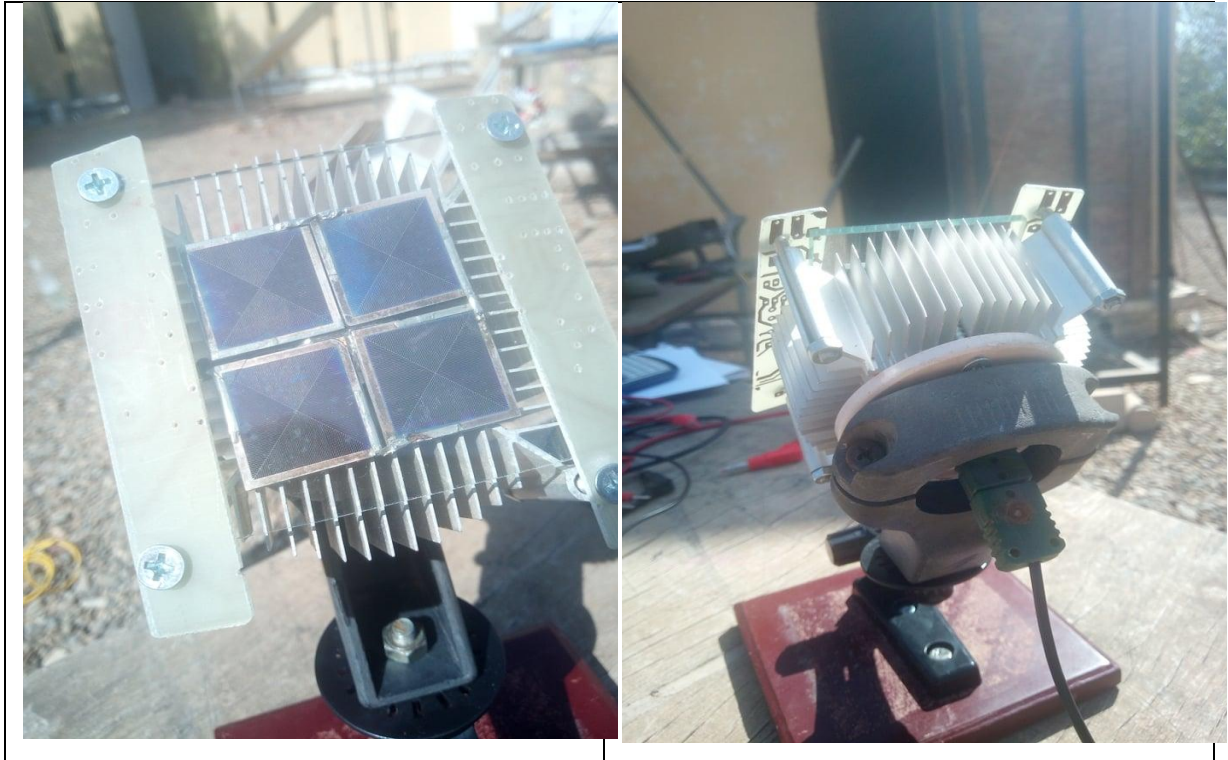


Figure (III -4) : l'emplacement des cellules sur le dissipateur de chaleur

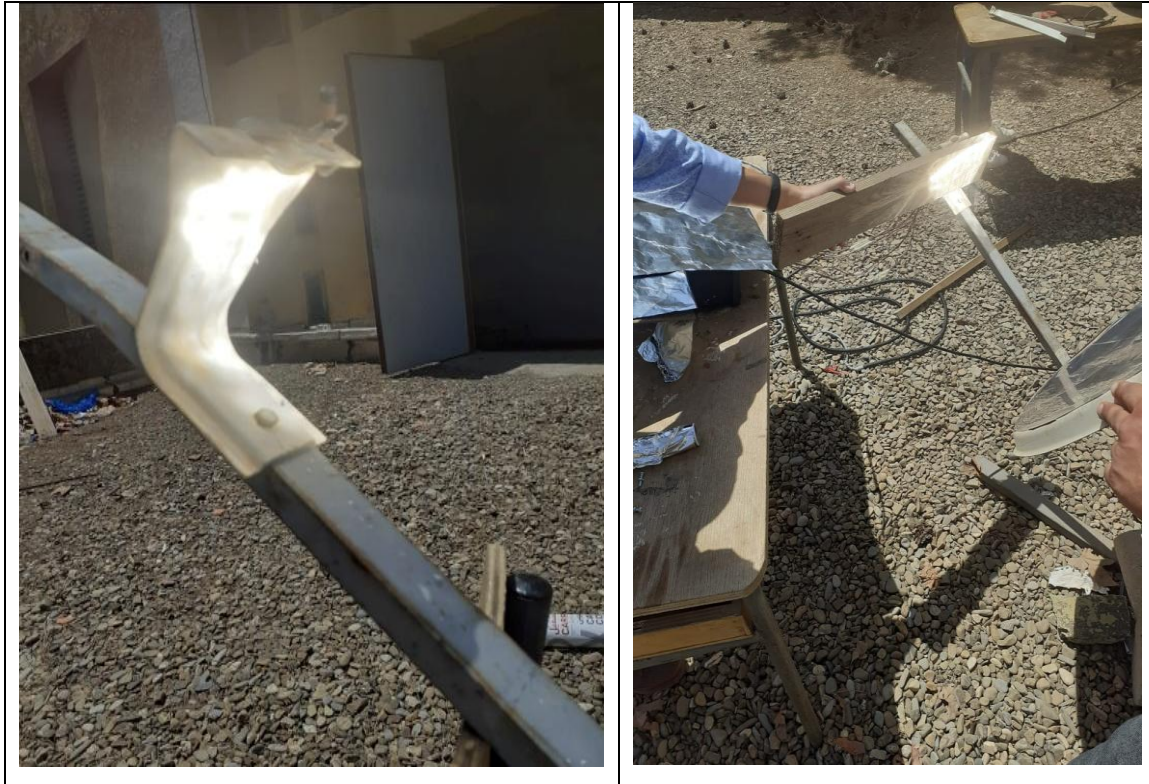
### III.3.3 L'expérimentation

#### III.3.3.1 Détermination du foyer de la parabole

Rappelons que le rôle de la parabole est de concentrer tout le rayonnement solaire reçu vers un point (foyer). Signalons que notre parabole n'est pas tout à fait ronde. Nous avons trouvé une distance focale égale à 0.78 m

Nous allons également procéder à la détermination expérimentale de cette distance en procédant à la localisation du point lumineux résultant de la lumière reflétée par la surface incurvée de la parabole figure (III -5).





**Figure (III -5) :** *détermination du foyer de la parabole*

### III.3.3.2 Mesure de la température du foyer

Le premier essai consiste à évaluer la distribution du flux concentré au foyer de la parabole. Ceci peut se réaliser à la distribution des températures dans la tache focale. La mesure des différentes températures au foyer de la parabole est assurée par des thermocouples de type K figure (III -6). Cette mesure nous permet de localiser avec précision la position du foyer en plaçant au foyer des thermocouples à différentes distances radiales en partant du centre.

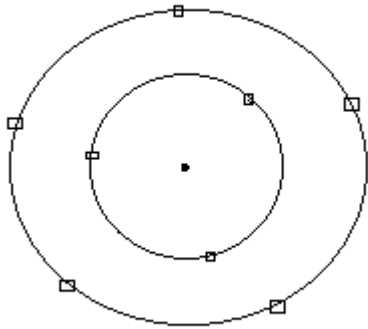


**Figure (III -6) :** *Thermocouple de type k*

On a pris une plaque en Al et on a tracé deux cercles concentriques de 1,5 cm, 3 cm et on a percé un premier trou au centre, 3 trous sur le premier cercle et 5 trous sur le second cercle



(diamètre des trous = 2 mm) et on a placé les thermocouples à l'intérieur des trous figure (III - 7).



**Figure (III -7) :** Schéma explicatif de disposition des thermocouples

Les photos de la figure (III -8) montrent l'emplacement et la liaison des thermocouples à l'acquisition des données.



**Figure (III -8) :** L'emplacement des thermocouples dans l'acquisition de données.

Pour connaître la température au niveau du foyer on a effectué des essais dans des conditions météorologiques variables et pour des périodes différentes.

### III.3.3.3 Installation du concentrateur

Nous savons que le concentrateur parabolique fonctionne quand les rayons solaires sont parallèles à son axe. Donc il faut le placer dans un environnement clair et bien aéré, avec un ciel dégagé en évitant les zones d'ombres autour de l'équipement.

Le système est dirigé vers le soleil et on installe les appareils de mesures (les pyranomètres et les thermocouples) pour mesurer l'éclairement et la température au niveau du récepteur. La poursuite du soleil est réalisée manuellement afin d'obtenir à chaque instant une bonne tâche focale.

### III.3.3.4 Mesure du rayonnement solaire

La mesure de l'éclairement global incident sur la surface de notre concentrateur est effectuée à l'aide d'un pyranomètre figure (III -9). Ce dernier est fixé sur un support installé parallèlement à la surface du concentrateur. A partir de la tension  $U_p$  mesurée à la sortie du pyranomètre (en  $\mu V$ ), on détermine la valeur du rayonnement solaire  $E$  ( $W/m^2$ ) par la relation :

$$E = \frac{U_p}{Sens}$$

La sensibilité de l'appareil, pour le modèle CM6B,  $Sens = 10.60 \mu V$ .



Figure (III -9) : Pyranomètre pour la mesure de l'éclairement.

Un deuxième pyranomètre dont la surface sensible est occultée permet de mesurer l'éclairement diffus. La valeur de l'éclairement direct est obtenue par différence.

$$\text{Eclairement direct} = \text{Eclairement global normal} - \text{Eclairement diffus.}$$



### III.3.3.5 Acquisitions des données

Un enregistreur de type Fluke Hydra Series II est utilisé pour l'acquisition des données. Il permet la lecture des différents paramètres à savoir : les températures ambiantes et celle des cellules placées au foyer ainsi que l'éclairage solaire et la tension délivrer par les cellules, voir figure (III -10).



**Figure (III -10) :** Enregistreur de données type *FLUKE HYDRA SERIES II*

Pour connaître la température au niveau de foyer on a effectué quelques essais pour des conditions météorologiques et des périodes différentes.

### III.3.3.6 Les thermocouples

Un thermocouple est constitué de deux conducteurs de matériau différents ou des ensemble à un bout et soumis à un gradient de température génère à leurs extrémités, une tension dépendante de la température et du choix des deux matériaux est alors délivrée.

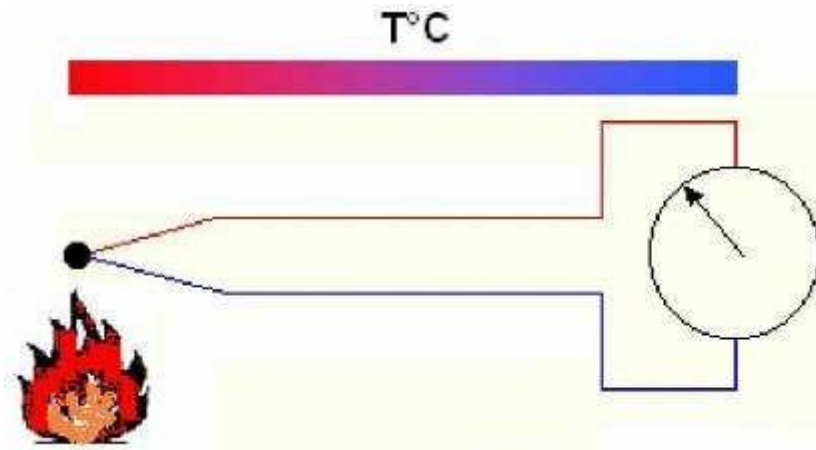
## III.3.4 Techniques de mesure et raccordements :

### III.3.4.1 Principe :

Si un écart de température est présent le long d'un fil métallique, il se produit un transfert de charge dépendant des caractéristiques du matériau. La conversion d'énergie génère à l'intérieur de ce conducteur une f.e.m. dont l'importance et le sens dépendent du matériau, de la direction et du gradient de température.

C'est pour cela que l'on utilise l'effet thermoélectrique avec 2 conducteurs soudés

ensemble à l'une de leur extrémité. On obtient alors une tension mesurable aux extrémités libres en présence d'un gradient de température.



**Figure (III - 11) :** Principe de fonctionnement d'un thermocouple

- Tolérance des thermocouples les plus courants

La norme CEI584.2 donne l'écart maximum admissible en °C dans des plages de température tableau (III - 2).

**Tableau (III - 2) :** Tolérance des thermocouples : [21]

THERMOCOUPLE	CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3
J  + -	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ de $-40$ à $375^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.004 \times t$ de $375^{\circ}\text{C}$ à $750^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ de $-40$ à $333^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.0075 \times t$ de $333^{\circ}\text{C}$ à $750^{\circ}\text{C}$	
K  + -	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ de $-40$ à $375^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.004 \times t$ de $375^{\circ}\text{C}$ à $1000^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ de $-40$ à $333^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.0075 \times t$ de $333^{\circ}\text{C}$ à $1200^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ de $-167$ à $40^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.015 \times t$ de $-200^{\circ}\text{C}$ à $-167^{\circ}\text{C}$
T  + -	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ de $-40$ à $125^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.004 \times t$ de $125^{\circ}\text{C}$ à $350^{\circ}\text{C}$	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ de $-40$ à $133^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.0075 \times t$ de $133^{\circ}\text{C}$ à $350^{\circ}\text{C}$	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ de $-67$ à $40^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.015 \times t$ de $-200^{\circ}\text{C}$ à $-67^{\circ}\text{C}$
E  + -	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ de $-40$ à $375^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.004 \times t$ de $375^{\circ}\text{C}$ à $800^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ de $-40$ à $333^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.0075 \times t$ de $333^{\circ}\text{C}$ à $900^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ de $-167$ à $40^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.015 \times t$ de $-200^{\circ}\text{C}$ à $-167^{\circ}\text{C}$
N  + -	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ de $-40$ à $375^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.004 \times t$ de $375^{\circ}\text{C}$ à $1000^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ de $-40$ à $333^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.0075 \times t$ de $333^{\circ}\text{C}$ à $1200^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ de $-167$ à $40^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.015 \times t$ de $-200^{\circ}\text{C}$ à $-167^{\circ}\text{C}$
S  + -	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ de $0$ à $1100^{\circ}\text{C}$ $\pm (1+0.003 \times (t-1100)) ^{\circ}\text{C}$ de $1100^{\circ}\text{C}$ à $1600^{\circ}\text{C}$	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ de $0$ à $600^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.0025 \times t$ de $600^{\circ}\text{C}$ à $1600^{\circ}\text{C}$	
R  + -	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ de $0$ à $1100^{\circ}\text{C}$ $\pm (1+0.003 \times (t-1100)) ^{\circ}\text{C}$ de $1100^{\circ}\text{C}$ à $1600^{\circ}\text{C}$	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ de $0$ à $600^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.0025 \times t$ de $600^{\circ}\text{C}$ à $1600^{\circ}\text{C}$	
B  + -		$\pm 0.0025 \times t$ de $600^{\circ}\text{C}$ à $1700^{\circ}\text{C}$	$\pm 4^{\circ}\text{C}$ de $600$ à $800^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.005 \times t$ de $800^{\circ}\text{C}$ à $1700^{\circ}\text{C}$

Les tests pour le 22 juin 2021 de (12h -12h40min) : le ciel clair

**Tableau (III -3) : testes des températures au niveau du foyer**

L'heure (minute)	Thermocouple de centre (°C)	Les thermocouples de 1 <sup>er</sup> cercle (°C)	Les thermocouple 2 ème cercle (°C)	L'ensoleillement (w/m <sup>2</sup> )
12h	386	348 335 351	369 350 331 376 349	810
12h10	332	283 275 292	268 337 278 320 296	887
12h20	273	202 204 224	280 265 281 273 283	906
12h30	339	314 287 292	291 313 312 299 300	925
12h40	334	311 250 289	276 314 320 299 330	915

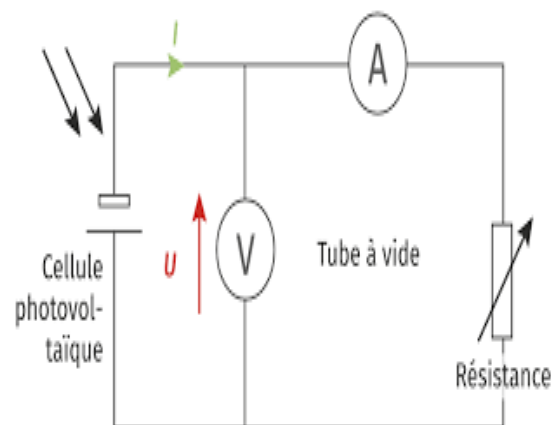
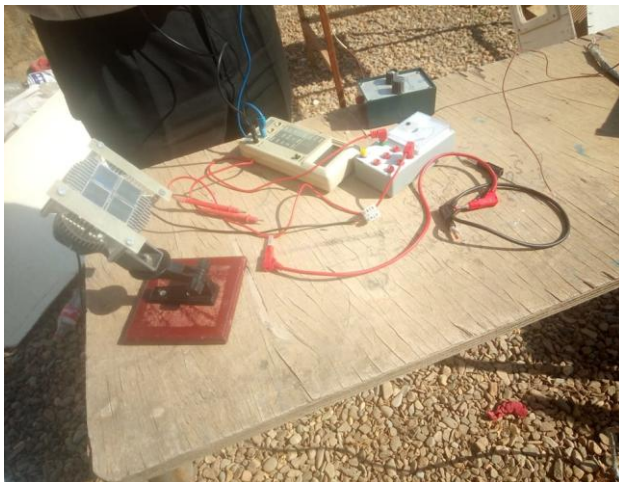
- **Compagne de mesures :**

### III.3.4.2 Principe de fonctionnement

Après le montage des différents éléments du système. En premier lieu nous décrivons le principe de fonctionnement de notre système, qui est un banc d'essai pour un prototype d'un concentrateur solaire à réflecteur parabolique. La parabole s'oriente vers le soleil et concentre le rayonnement solaire au niveau de foyer où sont placées les quatre cellules en silicium monocristallin, la poursuite du soleil est faite manuellement. Des capteurs de température seront installés sur le collecteur et sur l'absorbeur, un pyranomètre sera intégré pour déterminer le rayonnement solaire reçu par le système. Pour cela l'acquisition de plusieurs paramètres doit être faite et cela par l'intermédiaire d'un enregistreur communiquant à travers le port série, afin de connaître le comportement de l'installation en temps réel. Les valeurs de ces différents capteurs seront visualisées, traitées et sauvegardées par le logiciel lui-même (l'acquisition de données qui fait des lectures chaque 1 minute). Notre travail expérimental est divisé en deux parties :

La première partie, consiste à caractériser les 4 cellules solaires en les testant sous un soleil et la deuxième partie consiste à tester les cellules sous concentration.

- **Testes sans concentration :**



**Figure (III - 12) :** technique de mesure sans concentration

Afin d'évaluer les performances thermiques du prototype réalisé, des tests expérimentaux ont été effectués en conditions réelles de fonctionnement. Durant chaque test, on mesure la température ambiante, l'éclairement incident direct, la tension et le courant délivrés par les cellules.

### ➤ Test avec concentration :

Le principe est de placer les cellules au foyer de la parabole, on rajoute un deuxième pyranomètre pour calculer le rayonnement direct. La mesure de la courbe I-V est basée sur le contrôle du courant fourni par les cellules photovoltaïques entre le point de courant nul ( $V_{co}$ ) au point de court-circuit ( $I_{cc}$ ). Cette méthode consiste à utiliser une résistance variable comme indiqué sur la figure II-13. La valeur de la résistance  $R$  varie par paliers de zéro à l'infini afin de capturer les points de la courbe I-V de court-circuit à circuit ouvert, en mesurant la tension et le courant à chaque étape. Les valeurs sont détectées à l'aide d'une paire de multimètres numériques. Dans ce qui suit les étapes de la mesure :

- On met les potentiomètres (réglage approx et réglage fin) à leur point maximale  $\Rightarrow$  circuit ouvert  $\Rightarrow I_{sc} = 0$  et  $V_0$  (tension à vide).
- On diminue lentement la résistance du potentiomètre de réglage approx, tout en laissant le potentiomètre de réglage fin à zéro.
- On diminue par palier le potentiomètre approx en intervenant légèrement sur le potentiomètre fin, on prend les valeurs de  $I$  et  $V$ .
- On met les deux potentiomètres au minimum, la résistance sera pratiquement nulle et la tension devrait descendre à zéro  $V_{oc} = 0$ .

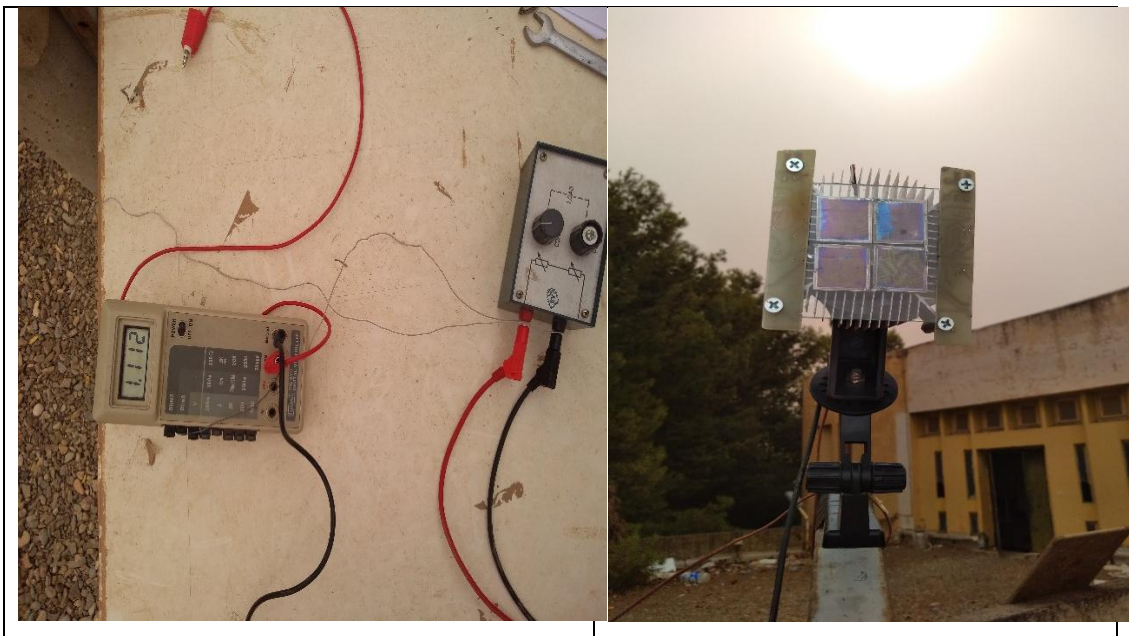


Figure (III - 13) : technique de mesure avec concentration

### III.4 Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre l'équipement à tester, à savoir, une parabole de télécommunication tapissée d'un film réflecteur haute performance dans laquelle on place en son foyer quatre cellules photovoltaïques au silicium monocristallin. Nous avons aussi décrit en détail les instruments de mesure utilisés et la conduite de l'expérimentation.

Les résultats de la simulation et l'acquisition continue de la courbe  $I(V)$  (courant-tension) des cellules dans différentes conditions de concentration solaire et de température d'exercice pour évaluer leur comportement seront discuter et interpréter dans le chapitre suivant.



# **Chapitre IV :**

## **Résultats et discussion**

IV.2 Introduction

Nous présenterons dans cette partie l'effet de la concentration solaire sur les paramètres des cellules photovoltaïques monocristallines (4 cellules placées en parallèles), Voc, Icc et la variation de rendement de conversion en fonction de l'éclairement pour différentes valeurs de résistances variables. Enfin la simulation est réalisée sous Matlab/Simulink selon un programme qui est présenté sur la figure (IV -1) :

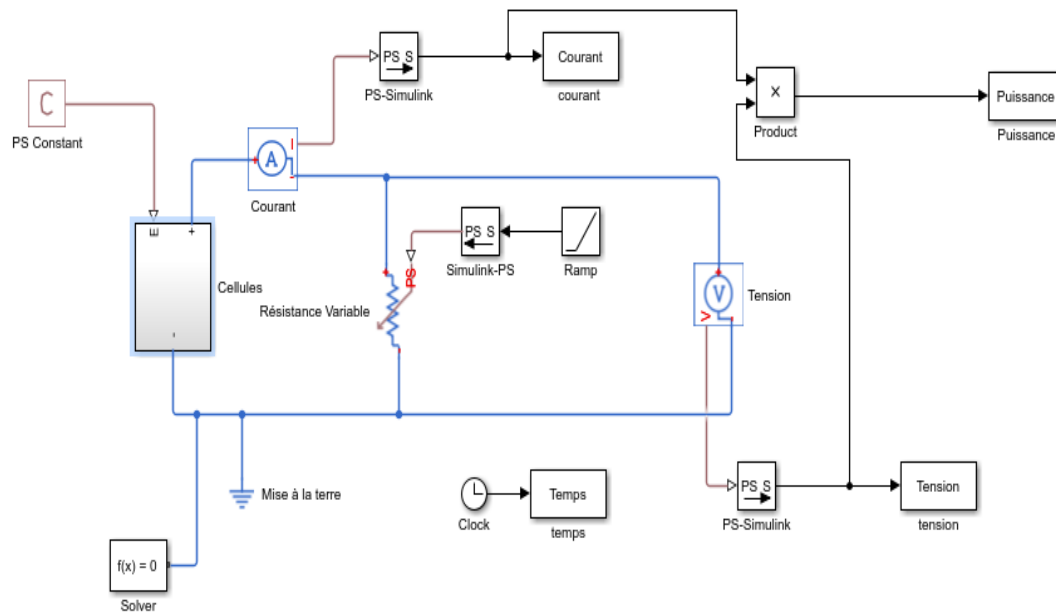


Figure (IV -1) : Programme de simulation sous Matlab/Simulink

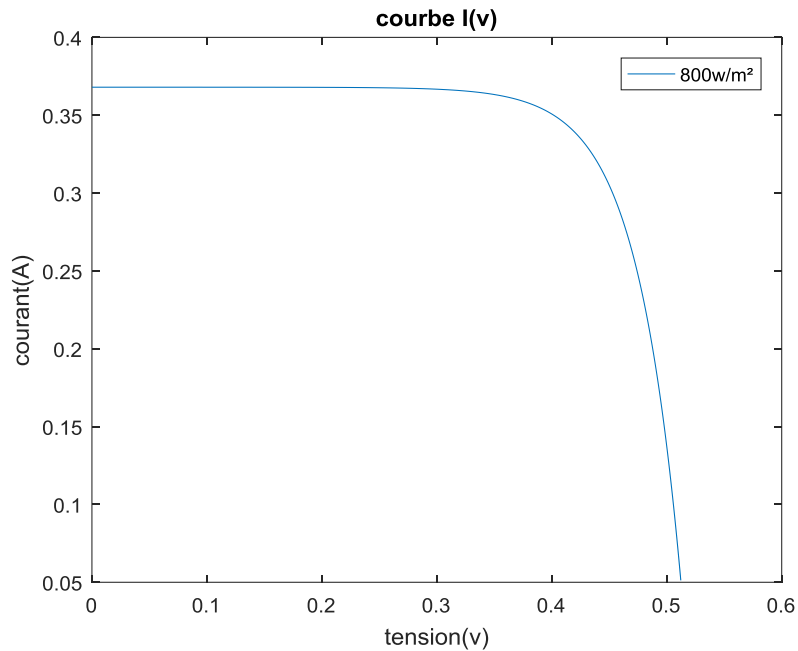
IV.3 Teste et résultats sous un soleil

• 1ere expérience

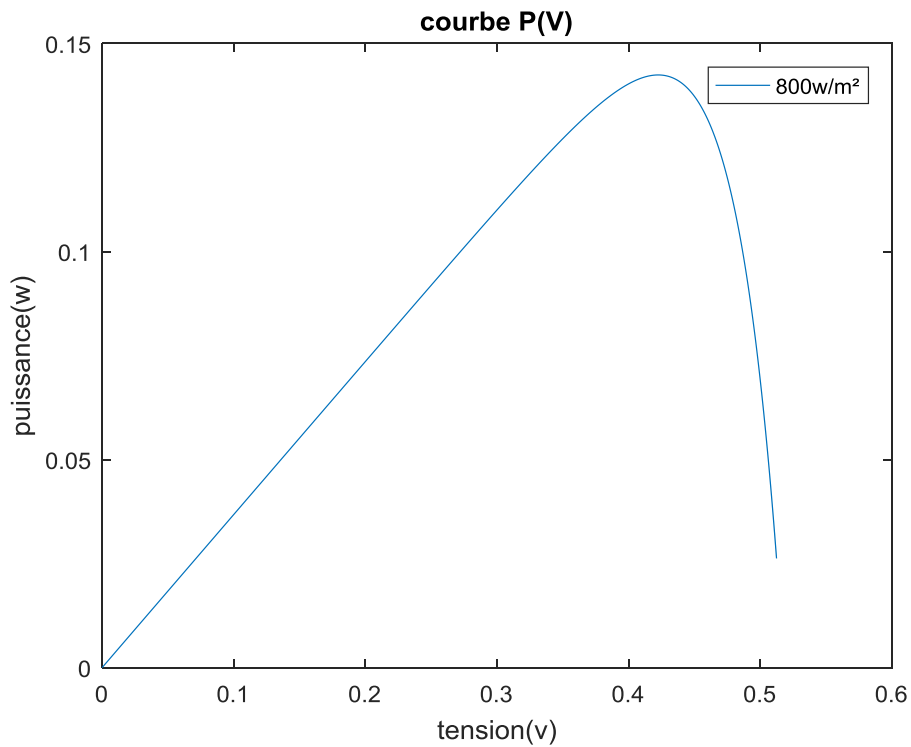
La première expérience effectuée sur les 4 cellules monocristallines ( $S= 25\text{cm}^2$ ) sous un éclairement de  $800\text{W/m}^2$ , ou la température ambiante est de  $31^\circ\text{C}$  et la température de la cellule  $42^\circ\text{C}$  avec des résistances variables de  $1.5\Omega, 3 \Omega$  et  $14\text{k} \Omega$ , des mesures de la caractéristique I-V et P-V :  $V_{co}=0.518\text{v}$ ,  $I_{sc}=0.092 \text{ A}$ , que nous avons effectuées sous un ciel dégagé, sont données dans le tableau IV-1 et les figures IV-2 et IV-3.

**Tableau (IV -1) :** valeurs mesurées de la tension et du courant généré par les cellules sous un éclairement de  $800\text{w/m}^2$

I(A)	0.092	0.076	0.08	0.07	0.064	0
V(v)	0	0.403	0.403	0.408	0.418	0.518



**Figure (IV -2) :** la courbe  $I(V)$  avec  $E_g=800\text{w/m}^2$



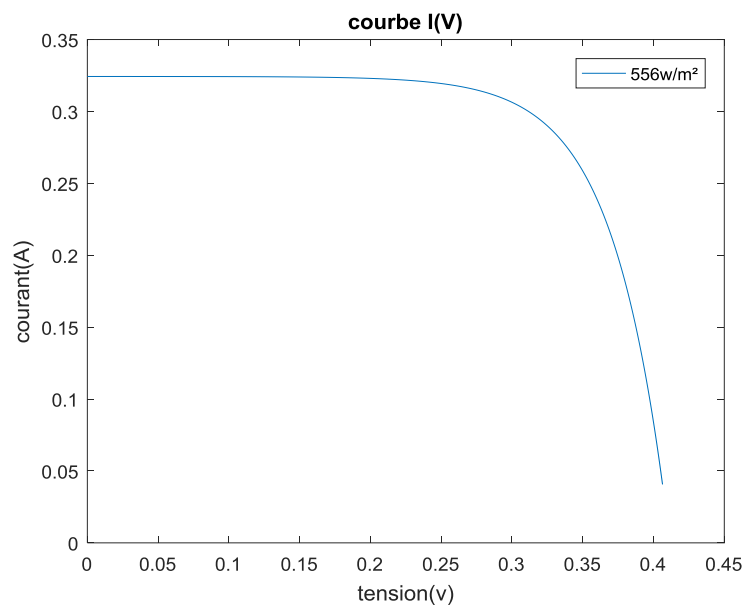
**Figure (IV -3) :** La courbe  $P(V)$  avec  $E_g=800\text{w/m}^2$

- 2 ième expériences :

On refait les mêmes tests que la première expérience mais cette fois ci sous un éclairement de  $566 \text{ W/m}^2$ , ou la température des cellules est de  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ , et la température ambiante  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ . Le courant de court-circuit  $I_{sc}=0.08 \text{ A}$ ,  $V_{co}=0.411 \text{ v}$ . Les données mesurées sont illustrées dans le tableau IV-2 et les figures IV-4 et IV-5.

**Tableau (IV -2) :** valeurs mesurées de la tension et du courant généré par les cellules sous un éclairement de  $566 \text{ W/m}^2$

I(A)	0.08	0.07	0.065	0.058	0
V(v)	0	0.409	0.401	0.375	0.411



**Figure (IV -4) :** La courbe  $I(V)$  avec  $E_g=566 \text{ W/m}^2$

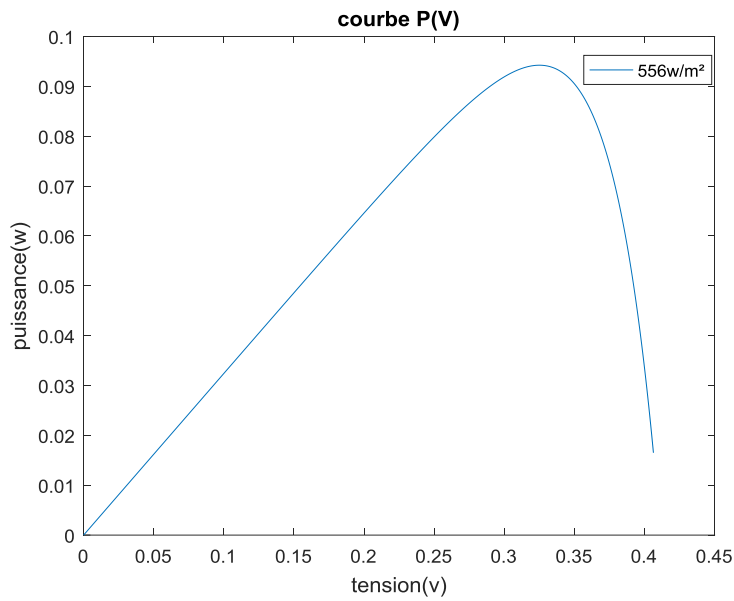


Figure (IV -5) : la courbe P(V) avec  $E_g=566 \text{ W/m}^2$

• 3 ième expériences :

Durant cette expérience l'éclairement est faible et égal  $226 \text{ W/m}^2$ , la température de la cellule est de  $41^\circ\text{C}$ . Les mesures relevées d' $I_{sc}$  et  $V_{co}$  sont respectivement :  $0.06 \text{ A}$  ,  $0.308 \text{ V}$  avec une température ambiante de  $28^\circ\text{C}$ . Les données mesurées sont illustrées dans le tableau IV-3 et les figures IV-6 et IV-7 :

Tableau (IV -3) : valeurs mesurées de la tension et du courant généré par les cellules sous un éclairement de  $226 \text{ W/m}^2$

I(A)	0.06	0.05	0.035	0.025	0
V(v)	0	0.216	0.164	0.121	0.308

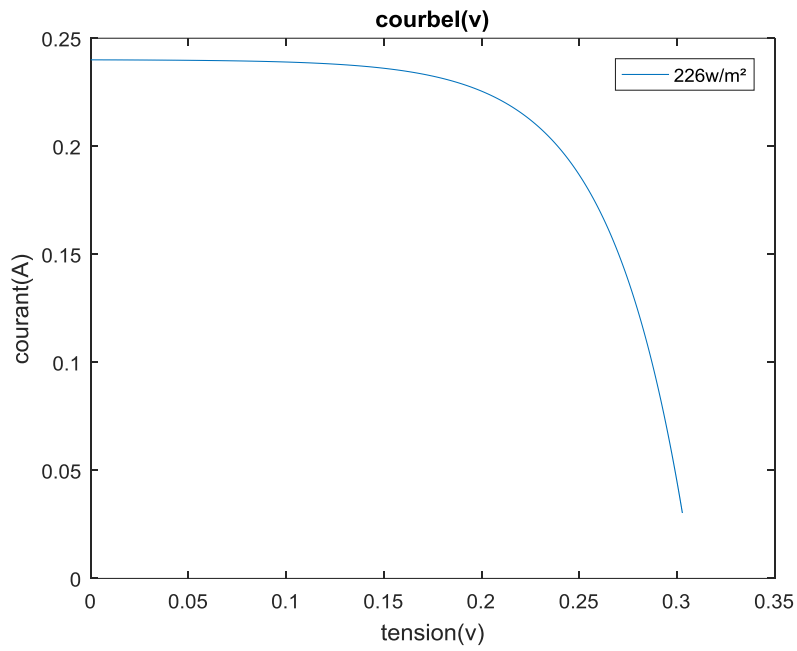


Figure (IV -6) : la courbe  $I(V)$  l avec  $E_g=226 \text{ W/m}^2$

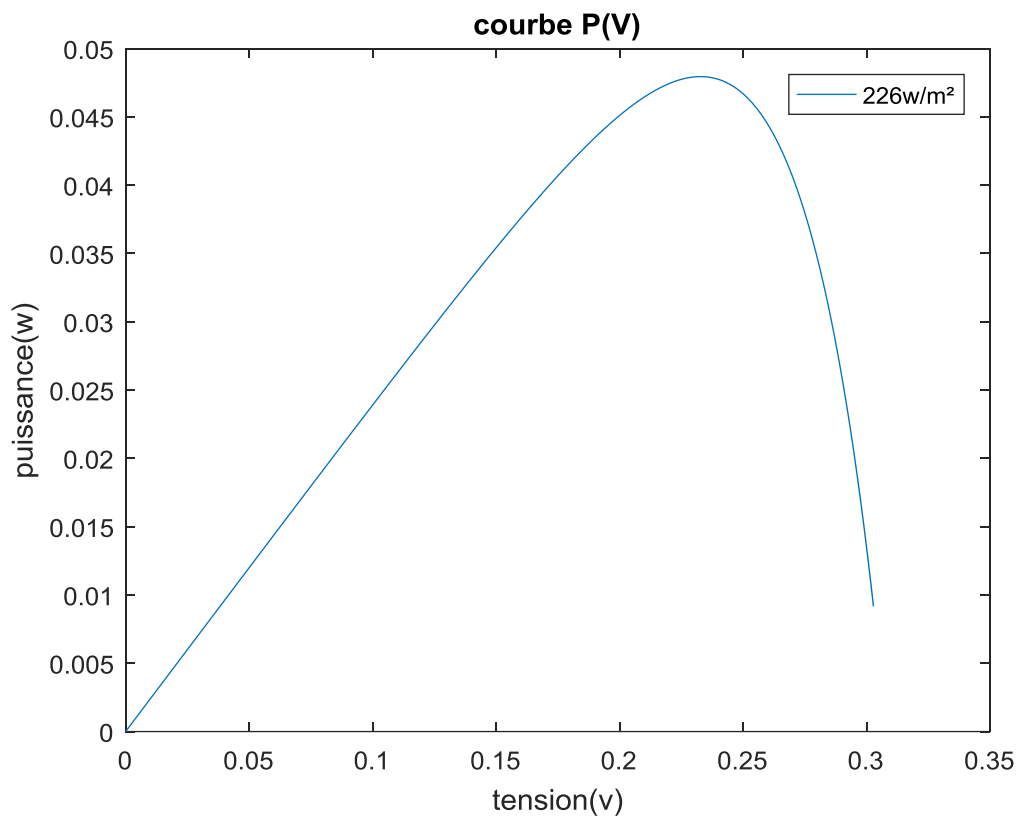


Figure (IV -7) : la courbe  $P(V)$  avec  $E_g=226 \text{ W/m}^2$

IV.4 Paramètres de caractérisation de tous les tests

Le tableau suivant présentés les résultats de la caractérisation de tous les tests :

Tableau (IV -4) : les résultats de la caractérisation de tous les tests

	Teste 1	Teste 2	Teste 3
I <sub>cc</sub> (A)	0.092	0.080	0.060
V <sub>co</sub> (v)	0.518	0.411	0.308
T <sub>amb</sub> (°C)	31	28	28
T <sub>cell</sub> (°C)	42	35	41
E <sub>d</sub> (w/m <sup>2</sup> )	800	566	226
P <sub>max</sub> (w)	0.0322	0.0286	0.0057
FF	0.67	0.87	0.30
η(%)	1.61	2.02	1.08

Les figures suivantes représentent les caractéristiques I-V et P-V pour diverses conditions de rayonnements solaire sous un soleil

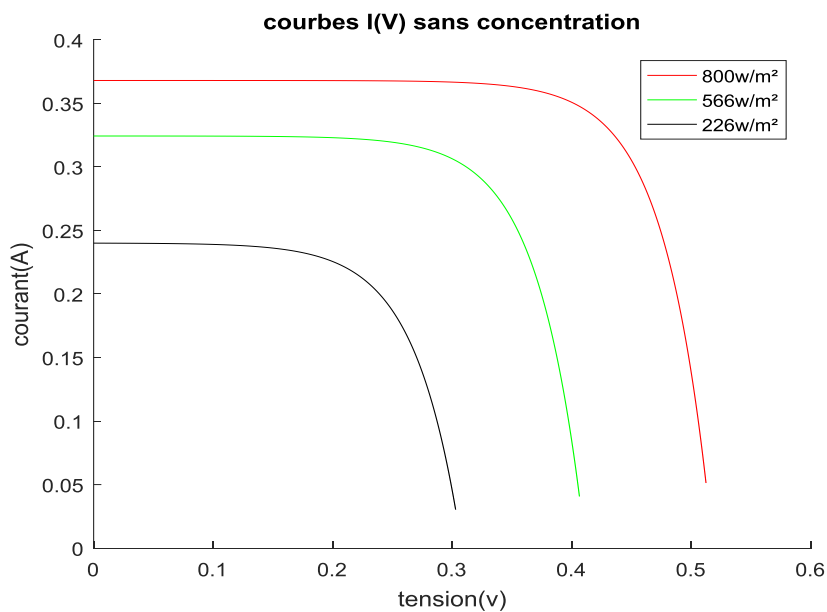


Figure (IV -8) : les courbes I(V) sous un soleil pour les différents éclairagements

La caractéristique d'une cellule photovoltaïque est directement dépendante de l'éclairément et de la température. La variation du courant et de puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairément, la figure (IV -8) montrent clairement l'existence de maxima sur les courbes de puissance correspondant aux points de puissance maximale. Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit I<sub>cc</sub> varie

proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  varie légèrement.

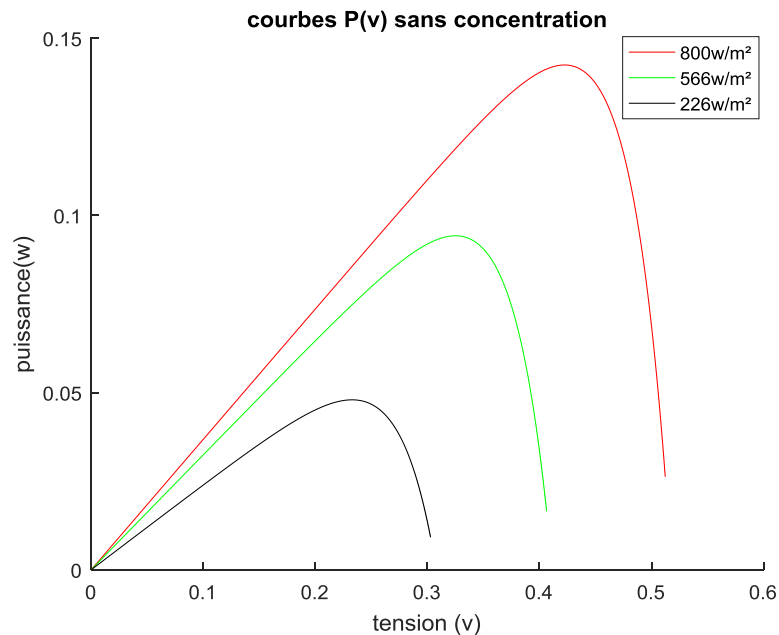


Figure (IV -9) : les courbes P(V) sous un soleil pour les différents éclairements

#### IV.4.1 La caractéristique I (V) et P(V) sous concentration

- 1ere expérience :

Le test effectué pour un éclairement direct  $I_d=715 \text{ W/m}^2$  est illustré dans le tableau IV et les caractéristiques sont illustrées dans les figures IV-10 et IV-11.

Tableau (IV -5) : valeurs mesurées de la tension et du courant généré par les cellules sous un éclairement  $I_d=715 \text{ w/m}^2$

I(A)	0.46	0.38	0.4	0.35	0.32	0
V (volt)	0	1.007	1.007	1.02	1.045	1.29



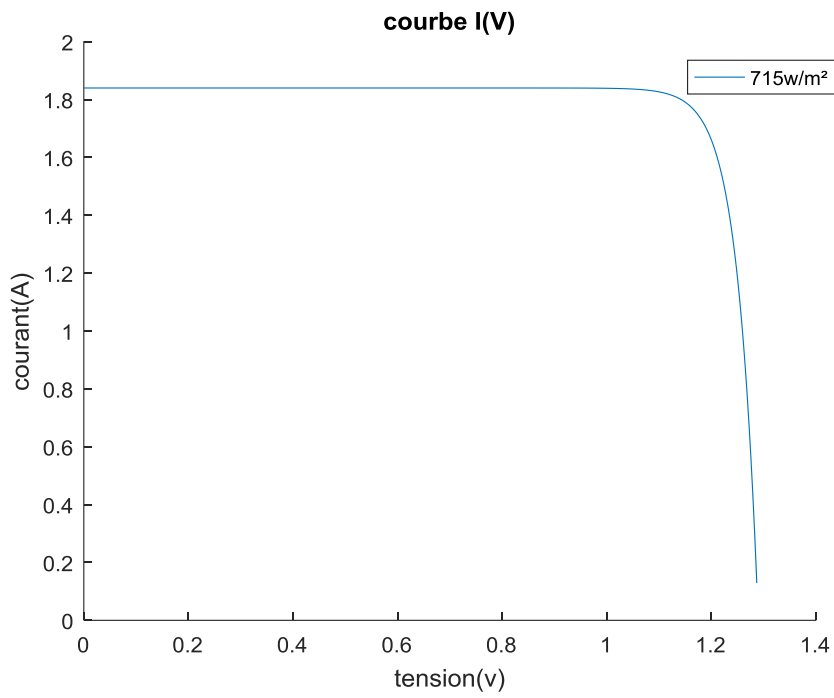


Figure (IV -10) : la courbe I(V) sous concentration avec  $I_d=715W/m^2$

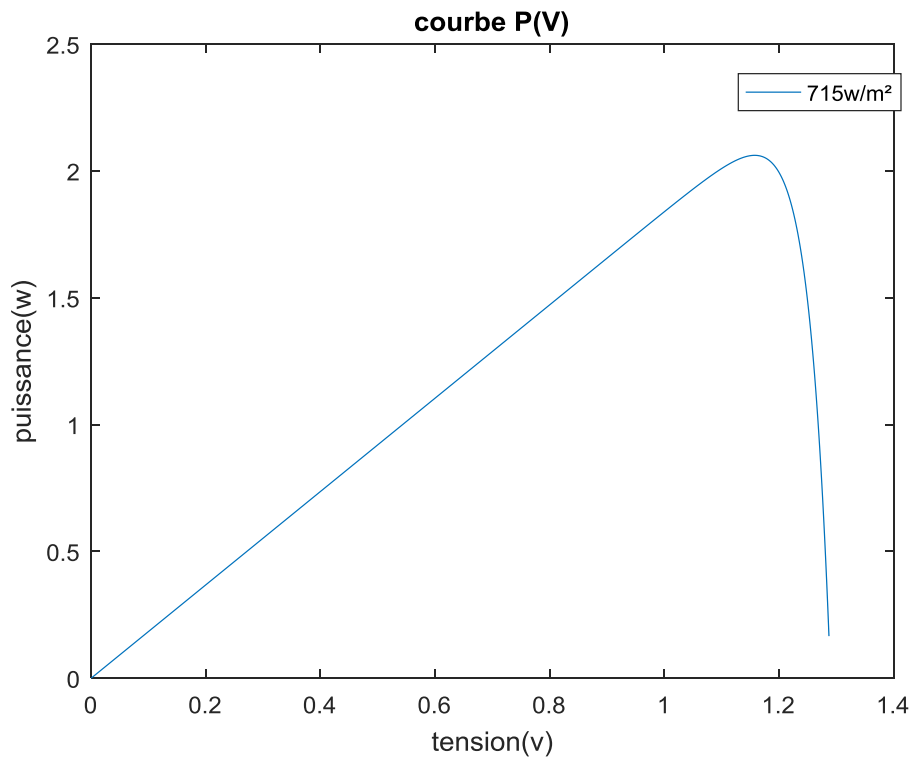


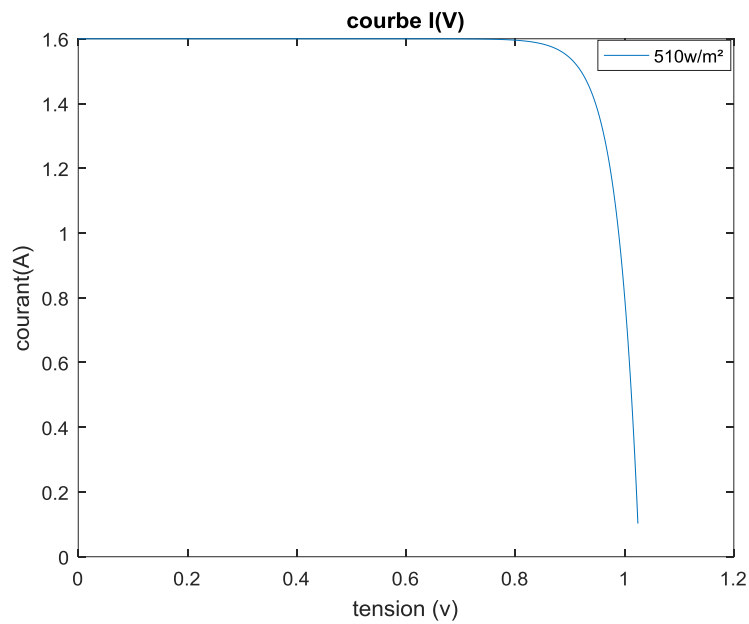
Figure (IV -11) : la courbe P(V) sous concentration avec  $I_d=715W/m^2$

• 2eme expérience :

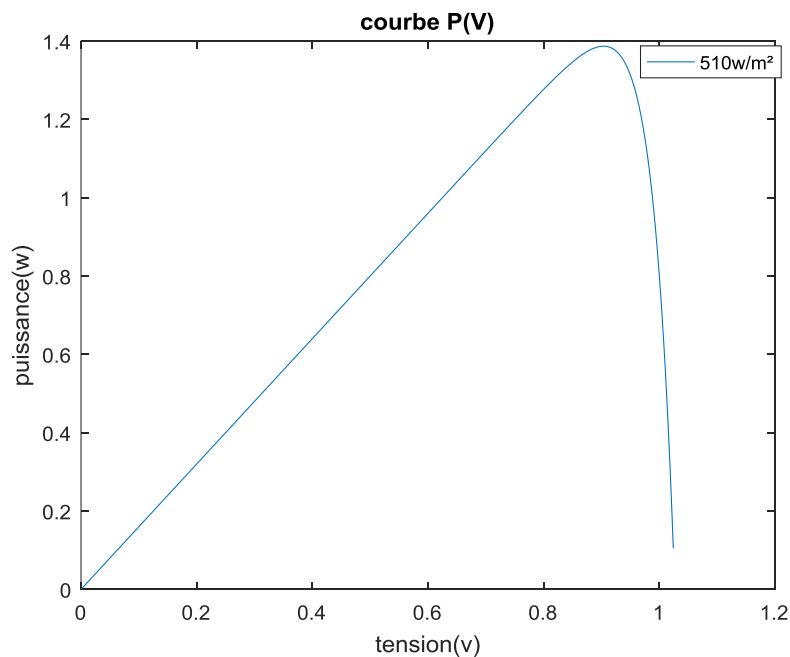
Cette fois ci les mesures sont prises sous un éclairement direct  $I_d=510 \text{ W/m}^2$  comme l'indique le tableau IV-6 et les caractéristiques sont illustrées dans les figures IV-12 et IV-13 :

**Tableau (IV -6) :** valeurs mesurées de la tension et du courant généré par les cellules sous un éclairement  $I_d=510\text{w/m}^2$

I(A)	0.4	0.35	0.325	0.29	0
V (volt)	0	1.022	1.0025	0.9375	1.027



**Figure (IV -12) :** La courbe I(V) sous concentration avec  $I_d=510 \text{ W/m}^2$



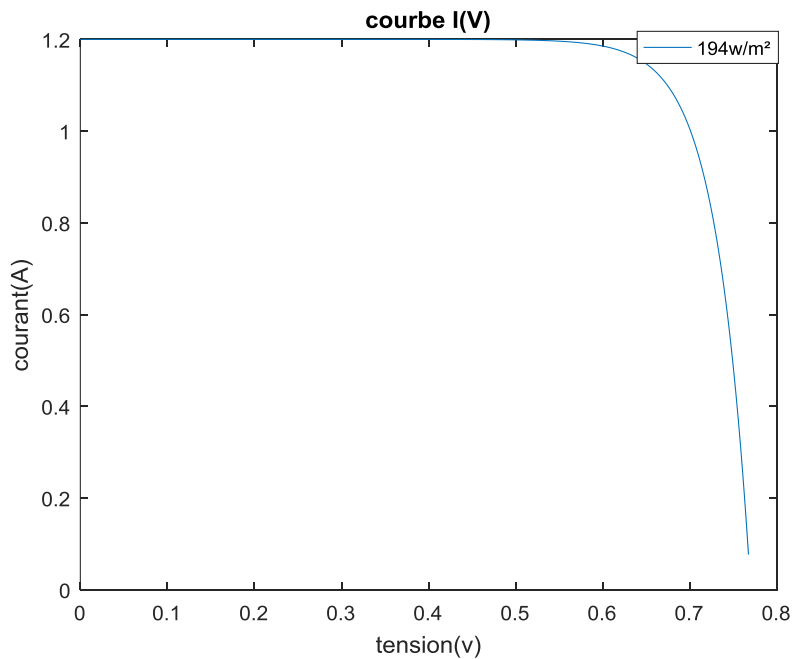
**Figure (IV -13) :** la courbe P(V) sous concentration avec  $I_d=510 \text{ W/m}^2$

- 3eme expérience :

Les résultats de la dernière expérience qui est faites sous un ciel couvert a un éclairement  $I_d=194 \text{ W/m}^2$  sont montrer dans le tableau et les caractéristiques sont illustrées par les figures IV-14 et IV-15.

**Tableau (IV -7) :** valeurs mesurées de la tension et du courant généré par les cellules sous un éclairement  $I_d=194 \text{ W/m}^2$

I(A)	0.3	0.175	0.125	0
V (volt)	0	0.41	0.302	0.77



**Figure (IV -14) :** la courbe I(V) sous concentration avec  $I_d=194 \text{ W/m}^2$

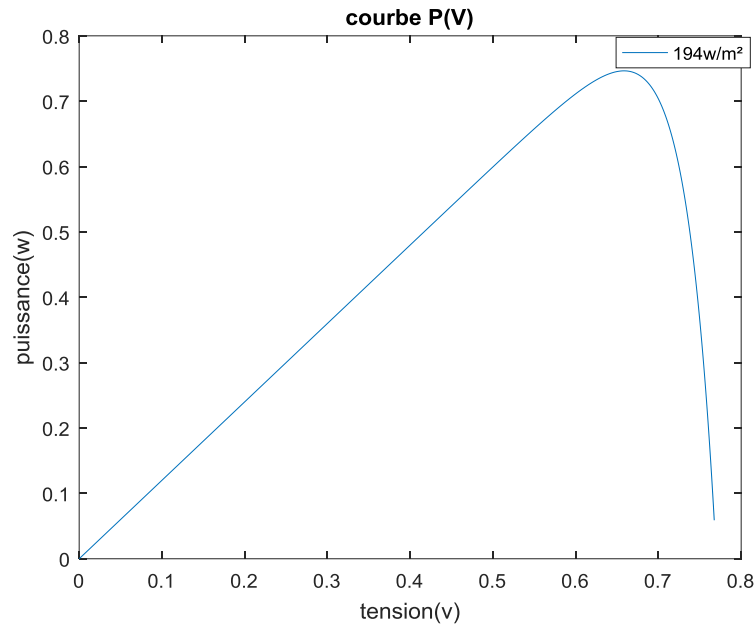


Figure (IV -15) : La courbe P(V) sous concentration avec  $I_d=194w/m^2$

Les différentes caractéristiques I-V et P-V pour diverses conditions de rayonnement solaire sous concentration sont illustrées dans ces figures suivantes :

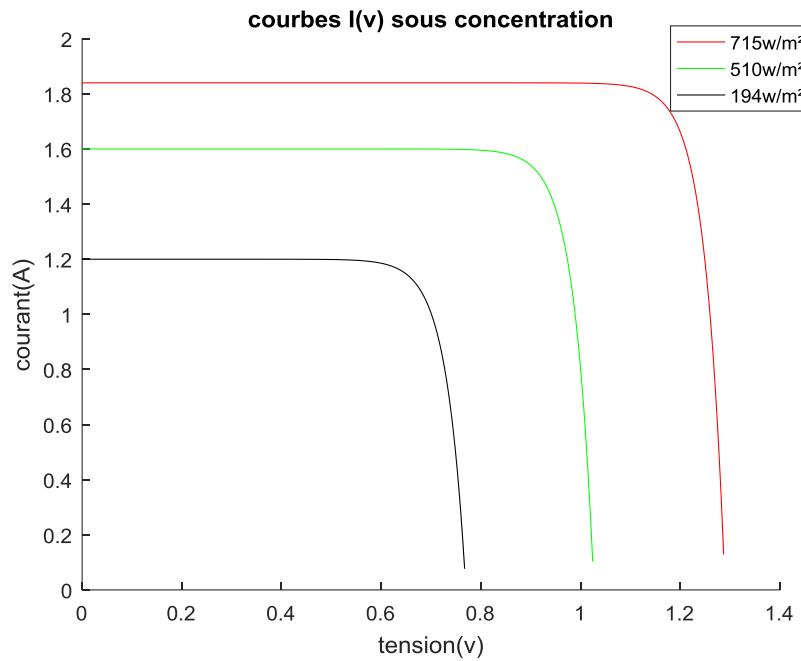
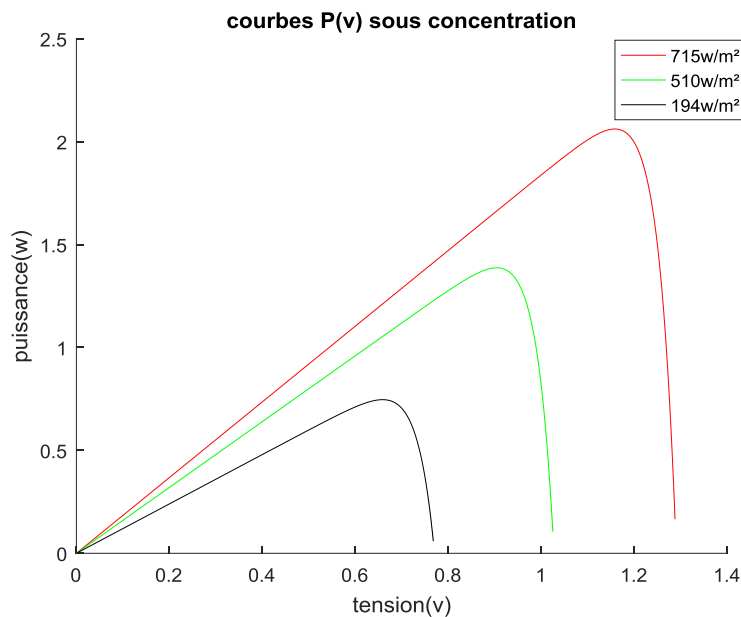


Figure (IV -16) : les courbes I(V) sous concentration pour les différents éclairements

Après l'analyse des données sous concentration, on observe que la concentration du rayonnement solaire, en raison d'un renforcement de la génération optique, produit une augmentation de la densité de courant circuit. Cette modification induit aussi la valeur de la tension de circuit ouvert légèrement supérieure à celle mesurée sous rayonnement non concentré.



**Figure (IV -17) :** les courbes P(V) sous concentration pour les différents éclairagements

Le tableau suivant présentés les résultats de la caractérisation de tous les tests :

**Tableau (IV -8) :** les résultats de la caractérisation de tous les tests

	Test 1	Test 2	Test 3
I <sub>cc</sub> (A)	0.46	0.4	0.3
V <sub>co</sub> (v)	2.59	1.027	0.77
T <sub>amb</sub> (°C)	38	31	29
T <sub>cell</sub> (°C)	140	110	98
I <sub>d</sub> (w/m <sup>2</sup> )	715	510	194
P <sub>max</sub> (w)	0.403	0.357	0.0717
FF	0.68	0.87	0.31
η(%)	22.5	28	14.7

### IV.5 Comparaison des résultats

Il est important de bien comprendre les variations de courant et de tension, notamment à travers l'étude du courant de court-circuit  $I_{sc}$ , de la tension en circuit-ouvert  $V_{oc}$  et du facteur de forme FF, ainsi que le rendement. D'après les résultats des tests effectués, on constate que les cellules montrent une efficacité importante avec la concentration.

### IV.6 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré pour l'analyse et la discussion des résultats, nous avons vu tout d'abord en quoi le comportement en extérieur des cellules photovoltaïques avec concentration diffère de celui des cellules sans concentration. Ensuite, nous avons décrit les données pertinentes à mesurer pour analyser le fonctionnement des cellules en conditions réelles.

# **Conclusion générale**

## **Et perspective**

## Conclusion générale et perspective

Dans le contexte actuel de changement climatique et de développement des énergies non carbonées, ce manuscrit propose d'apporter des éléments de réponse scientifiques et techniques sur l'étude d'une technologie renouvelable émergente : le photovoltaïques à concentration (CPV). Lors de cette partie introductive, nous avons vu d'abord le rôle que joue l'énergie solaire dans la transition énergétique. Ensuite on a abordé le sujet sous un regard plus technique, en présentant la place et les enjeux du CPV dans les technologies solaires existantes, et l'importance que joue une meilleure compréhension du comportement des cellules dans l'amélioration de la technologie. Puis la présentation du banc d'essai et les différents tests effectués sans et sous concentration selon différents éclairagements et températures. Une comparaison entre les deux tests et les résultats de travail sont analysés et discutés. Pour conclure ce travail, nous tenons à proposer des pistes d'étude afin d'approfondir les questions abordées dans cette thèse. En effet, par manque de temps ou de moyens de mesure, il n'a pas été possible de répondre complètement à certaines problématiques soulevées dans ce travail. L'expérience acquise permet de donner quelques suggestions d'éléments de réflexion pour de futurs travaux de recherche.

L'utilisation du banc de caractérisation a montré des résultats encourageants. L'étude présentée ici a été réalisée sur des cellules à base de silicium monocristallin qui sont les plus couramment utilisées. Afin de compléter et d'étendre cette étude, d'autres cellules peuvent être caractérisées : les cellules à contacts arrières interdigités, qui sont particulièrement adaptées pour le travail sous concentration, les cellules à base de GaAs, qui possèdent un meilleur comportement en température sous 1 soleil que les cellules à base de silicium monocristallin.

Pour aller plus loin le mécanisme du suiveur solaire présent de nombreux avantages, elle permet de pointer les cellules photovoltaïques face au soleil à tout moment de la journée et au fil de l'année à travers le repérage du soleil en altitude et en azimut.

D'autre part, l'ajout d'un dispositif qui nous permet de tracer la courbe I-V (un traceur sensible) est nécessaire, il est plus rapide et précis que la méthode utilisant une charge résistive, utilisée, et qui présente des inconvénients (le temps de mesure relativement long, le nombre limité de points de mesure, etc.) pouvant entacher l'exactitude des mesures.



# Références Bibliographique

- [1] Ballo Djibril Bettarcha, Nesrine Manel, "étude expérimentale d'un retro-concentrateur solaire parabolique", mémoire master, université Mostaganem, 2019.
- [2] Reteri Ahmed, Fentrouci Ahmed, "étude de refroidissement des capteurs hybrides photovoltaïque –thermique (PV/T) a l'aide des MCP", mémoire master, université Tlemcen, 2013.
- [3] Slaimi Nassima, "transfert d'énergie solaire concentre par fibre optique", mémoire master, université Tlemcen, 2016.
- [4] M.chedala, R.merikhi, " conception et réalisation d'un concentrateur cylindro – parabolique pour production d'énergie thermique", mémoire master, université el oued, 2016.
- [5] Djelloul Benatiallah, "détermination du gisement solaire par imagerie satellitaire avec intégration dans un système d'information géographique pour le sud d'Algérie", thèse de doctorat, université d'Adrar, 2019.
- [6] Abdelkader Belhadj, communique scientifique, université Tlemcen.
- [7] <https://www.soltys.fr/fr/content/5-l-energie-solaire-dans-le-monde>
- [8] Sarah Cherifi, Mohamed Haddad, " l'énergie solaire un moteur du développement durable en Algérie ", 2019.
- [9] Arras Aida, " caractérisation des cellules photovoltaïque à base d'hétérojonction de silicium", mémoire master, université Tlemcen, 2018.
- [10] Lynda Debit, " modélisation et commande pour la poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque en tenant compte de la variation de la température" mémoire master, université Tizi Ouzou, 2018.
- [11] Khelil Massinissa, Ibazizen Walid, "étude comparative de deux stratégie de commande MPPT destinées a la production d'énergie photovoltaïques", école supérieur navale Tamntfoust, 2020.
- [12] Emmanuel Giudicelli, " évaluation d'une filière technologique de cellules photovoltaïques multi jonctions à base de matériaux antimoniures pour applications aux très fortes concentrations solaires ", thèse de doctorat, université de Montpellier ,2018.
- [13] Benoit Guillo Lohan, " modélisation et caractérisation de cellules photovoltaïques à base de silicium cristallin pour des applications sous concentration", thèse de doctorat, université de Lyon, 2018.

[14] Kaddour Abdelmadjid, modélisation et simulation d'un concentrateur parabolique solaire à moteur Stirling en vue d'un rendement optimal, thèse de doctorat, université de Tlemcen ,2013.

[15] clément weick , "vers un module photovoltaïque a concentration ultra-intègre", thèse de doctorat, université Grenoble alpes, 2016.

[16] S. P. Philipps, A. W. Bett, K. Horowitz, and S. Kurtz, "Current status of concentratorphotovoltaic(CPV)technology,"tech.rep.,NRELandFraunhoferISE,2017.

[17] [http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Le\\_photovolt%C3%AFque\\_sous\\_concentration](http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Le_photovolt%C3%AFque_sous_concentration)

[18] Seghir Mouad, "étude comparative entre un concentrateur solaire parabolique et cylindro-parabolique», mémoire master, université Bechar, 2018.

[19] <https://www.powerfromthesun.net/book.html>

[21] Abadou Aziz, Benbaziz Redouane, " conception et réalisation d'un stérilisateur solaire de type autoclave", mémoire master, université Blida ,2015.

[20] M.chedala, R.merikhi, " conception et réalisation d'un concentrateur cylindro-parabolique pour production d'énergie thermique", mémoire master, université el oued, 2016.

[19] Rahmani djeloul, "analyse d'un système de concentration solaire pour la production d'hydrogène", mémoire magister, université Chlef, 2013.

[23] F. Almonacid , P. J. Pérez-Higueras , E. F. Fernandez , and P. Rodrigo, "Relation between the cell temperature of a HCPV module and atmospheric parameters ", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 105, pp. 322-327, 2012.

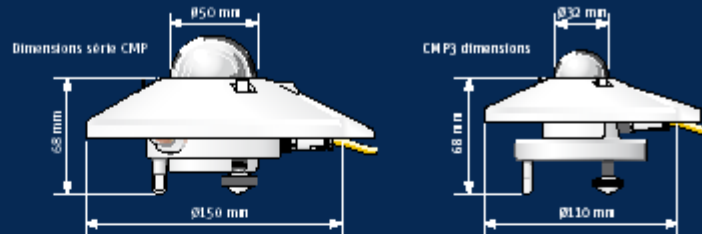
[22] Zeghib Ilham, "étude et réalisation d'un concentrateur solaire parabolique ", mémoire magister, université de Constantine, 2005.

# Annexes

## **DESCRIPTION DU BANC D'EXPERIMENTATION**

Le banc d'expérimentation est composé d'un data-logger (équipement clé du banc d'essai), d'instruments de mesure (thermocouples, pyranomètres etc.) et d'un rhéostat de laboratoire (équipement spécifique pour le tracé de la courbe I-V).

Le data-logger est composé des mots "logger" qui est un enregistreur et "data" qui correspond à « données ». C'est un ensemble électronique et informatique, d'éléments permettant d'acquérir et d'enregistrer des paramètres physiques ou électriques sur des phénomènes à analyser, que l'on souhaite vérifier ou dont on veut connaître les lois de variation, pour pouvoir les améliorer, les comprendre et ce à des intervalles déterminés sur une période de temps donnée. Le data-logger décrit est composé d'une ou plusieurs entrées capteurs et d'une unité de traitement et de mémorisation. Pour assurer une grande autonomie, les data-loggers font appel à des circuits intégrés consommant très peu d'énergie. Ils permettent la mesure de différentes grandeurs physiques (tension, température, courant, pression, force,). L'avantage des enregistreurs de données (data-logger) est qu'ils peuvent fonctionner indépendamment d'un ordinateur. Lors de l'activation, les enregistreurs de données sont généralement déployés et laissés sans surveillance pour mesurer et enregistrer des informations pour la durée de la période de surveillance.



Caractéristiques techniques	CMP 3	CMP 6	CMP 11	CMP 21	CMP 22
Classe ISO 9060:1990	Seconde Classe	Première Classe	Etalon Secondaire	Etalon Secondaire	Etalon Secondaire
Temps de réponse (95 %)	< 18 s	< 18 s	< 5 s	< 5 s	< 5 s
Zero offsets (a) rayonnement thermique (200 W/m <sup>2</sup> ) (b) changement de température (5 K/hr)	< 15 W/m <sup>2</sup> < 5 W/m <sup>2</sup>	< 12 W/m <sup>2</sup> < 4 W/m <sup>2</sup>	< 7 W/m <sup>2</sup> < 2 W/m <sup>2</sup>	< 7 W/m <sup>2</sup> < 2 W/m <sup>2</sup>	< 3 W/m <sup>2</sup> < 1 W/m <sup>2</sup>
Non-stabilité (changement/an)	< 1 %	< 1 %	< 0.5 %	< 0.5 %	< 0.5 %
Non-linéarité (0 to 1000 W/m <sup>2</sup> )	< 1 %	< 1 %	< 0.2 %	< 0.2 %	< 0.2 %
Erreur de relèvement (à 80° et 1000 W/m <sup>2</sup> )	< 20 W/m <sup>2</sup>	< 20 W/m <sup>2</sup>	< 10 W/m <sup>2</sup>	< 10 W/m <sup>2</sup>	< 5 W/m <sup>2</sup>
Influence de la température sur la sensibilité	< 5 % (-10 °C to +40 °C)	< 4 % (-10 °C to +40 °C)	< 1 % (-10 °C to +40 °C)	< 1 % (-20 °C to +50 °C)	< 0.5 % (-20 °C to +50 °C)
Erreur d'inclinaison (à 1000 W/m <sup>2</sup> )	< 1 %	< 1 %	< 0.2 %	< 0.2 %	< 0.2 %
<b>Autres caractéristiques</b>					
Sensibilité	5 to 20 µV/W/m <sup>2</sup>	5 to 20 µV/W/m <sup>2</sup>	7 to 14 µV/W/m <sup>2</sup>	7 to 14 µV/W/m <sup>2</sup>	7 to 14 µV/W/m <sup>2</sup>
Impédance	20 to 200 Ω	20 to 200 Ω	10 to 100 Ω	10 to 100 Ω	10 to 100 Ω
Précision de nivelage	1°	0.1°	0.1°	0.1°	0.1°
Température de service	-40 °C to +80 °C	-40 °C to +80 °C	-40 °C to +80 °C	-40 °C to +80 °C	-40 °C to +80 °C
Domaine spectral (50 % points)	300 to 2800 nm	285 to 2800 nm	285 to 2800 nm	285 to 2800 nm	200 to 3600 nm
Signal de sortie typique pour applications atmosphériques	0 to 20 mV	0 to 20 mV	0 to 15 mV	0 to 15 mV	0 to 15 mV
Rayonnement maxi	2000 W/m <sup>2</sup>	2000 W/m <sup>2</sup>	4000 W/m <sup>2</sup>	4000 W/m <sup>2</sup>	4000 W/m <sup>2</sup>
Incertitude journalière attendue	< 10 %	< 5 %	< 2 %	< 2 %	< 1 %
Applications recommandées	Mesures routinières en météorologie et en industrie	Mesures dans les domaines hydrologique, agricole et de culture sous serres	Réseaux météorologiques; tests sur des panneaux solaires; tests climatiques	Réseaux météorologiques; mesures en environnement aride ou polaire	Recherche scientifique exigeant le plus haut niveau de précision et de stabilité

La longueur standard des câbles des capteurs CMP est de 10 m. Il existe en option des longueurs de 25 ou 50 m

Thermistance 10k incorporée ou Pt-100 en option pour les CMP 21 et CMP 22

Pour le CMP 21 et le CMP 22, la réponse en fonction de la température et le résultat des tests angulaires sont fournis en plus du certificat d'étalonnage.

Nota : Les spécifications dans le tableau sont le plus mauvais cas ou le minimum et/ou maximum.



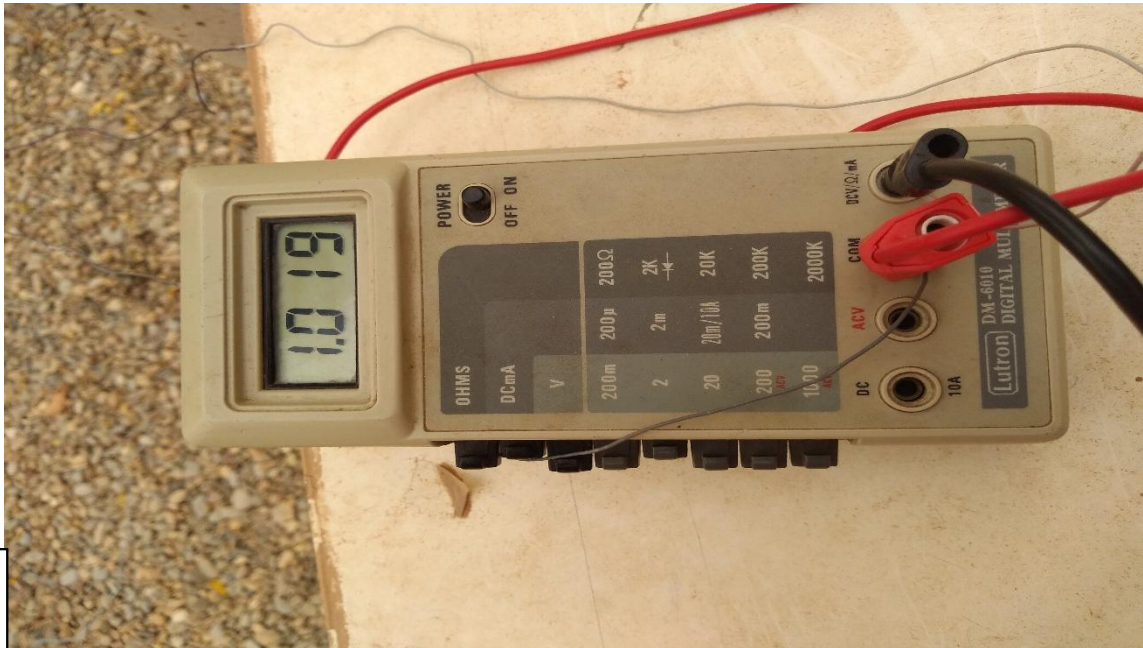
Liste de nos distributeurs sur [www.kippzonen.com](http://www.kippzonen.com)

**SALES OFFICE**

Kipp & Zonen France S.A.R.L.  
7 Avenue Clément Ader  
ZA Penroy - Bâtiment M  
94420 La Pléssis Trévise, France  
T: +33 (0) 1 49 62 41 04  
F: +33 (0) 1 49 62 41 02  
[kipp.france@kippzonen.com](mailto:kipp.france@kippzonen.com)

Kipp & Zonen B.V. se réserve le droit de modifier sans préavis les caractéristiques des produits figurant dans ce document

001a 070 - V1112F



Pays: <a href="#">Taiwan (Republique de Chine)</a>	Fabricant / Marque: <a href="#">Lutron, Taipei</a>
Année: 1982	Catégorie: Appareils de mesure et de dépannage (matériel de labo)
Semi-conducteurs (seuls les transistors sont comptés)	Semi-conducteurs présents
Gammes d'ondes	- sans
Particularités	
Tension / type courant	Piles (rechargeables ou/et sèches) / 9 Volt
Haut-parleur	-- Pas de sortie basse fréquence
Puissance de sortie	
De Radiomuseum.org	Modèle: <b>Digital Multimeter DM-6011A</b> - Lutron; Taipei
Matière	Plastique moderne (pas de bakélite, ni de catalin)
Forme	Portable, appareil de poche. Taille < 20cm
Dimensions (LHP)	90 x 180 x 35 mm / 3.5 x 7.1 x 1.4 inch
	3 1/2 Digits.
	DC: 0,2-1000 V.
	AC: 200-1000 V.
Remarques	DC: 0,2-200 mA, 10 A.
	Ohm: 2-2000 kOhm.
	Diode check.
	HFE test for PNP and NPN transistors.
Poids net	0.240 kg / 0 lb 8.5 oz (0.529 lb)