

# **CHAPITRE02**

## **MESURE DE LA RADIATION SOLAIRE**

## Introduction

Dans ce chapitre nous présentons quelques outils de mesure du rayonnement solaire tel que les Pyranomètre et les Solarimètre, nous exposons aussi leurs principes de fonctionnements, ainsi que quelques types de capteurs comme les photodiodes, les photorésistances et les cellules solaires.

## 1. Techniques pour capter l'énergie solaire

Un large éventail de technique de mesure de la puissance du rayonnement existe, On peut les classés selon le type des capteurs utilisés comme suit :

### **1.1. Capteurs thermiques**[26]

Les capteurs thermiques absorbent les radiations qu'ils reçoivent et les dégradent en énergie thermique qui sera convertie sous une forme qui permet sa mesure. On distingue:

- Les pyranomètre : mesurent le rayonnement d'origine solaire qui provient de tout un hémisphère.
- Les pyrgéomètres : mesurent les rayonnements de grande longueur d'onde descendant (rayonnement atmosphérique) ou ascendant (rayonnement terrestre).
- Les pyrradiomètres : mesurent l'ensemble des rayonnements de courte et de grande longueur d'onde arrivant sur un plan (ascendant ou descendant).

### **1.2. Capteurs quantiques (photovoltaïques)**

Ils utilisent les quanta d'énergie radiative qu'ils absorbent, pour libérer des électrons qui produisent un courant électrique. Au niveau des détecteurs, cet effet peut se traduire par l'apparition d'une tension (détecteur photovoltaïque) une variation du taux d'émission des électrons par une surface (détecteur photoémetteur) ou par le changement de conductivité du détecteur (détecteur photoconducteur). [10]

## 2. Instrument de mesure du rayonnement solaire

Selon le type de rayonnement qu'on veut mesurer nous avons le choix entre les instruments de mesure, ceux qui mesurent l'irradiance directe, diffuse ou globale. On s'intéresse surtout aux deux derniers types pour mesurer le rayonnement solaire global au niveau du sol, où on peut utiliser l'un des instruments suivants [18] :

### 2.1. Pyranomètre

#### 2.1.1. Définition

Le pyranomètre est un capteur de flux thermique utilisé pour la mesure de la quantité d'énergie solaire en lumière naturelle (le rayonnement global du ciel) [10] il est notamment utilisé en météorologie. Il permet la mesure de la puissance du rayonnement solaire total en watts par mètre carré. Il est sensible dans un domaine spectral de 300 à 3000 nanomètres selon le filtre utilisé [6].



**Fig 2.1:** Pyranomètre

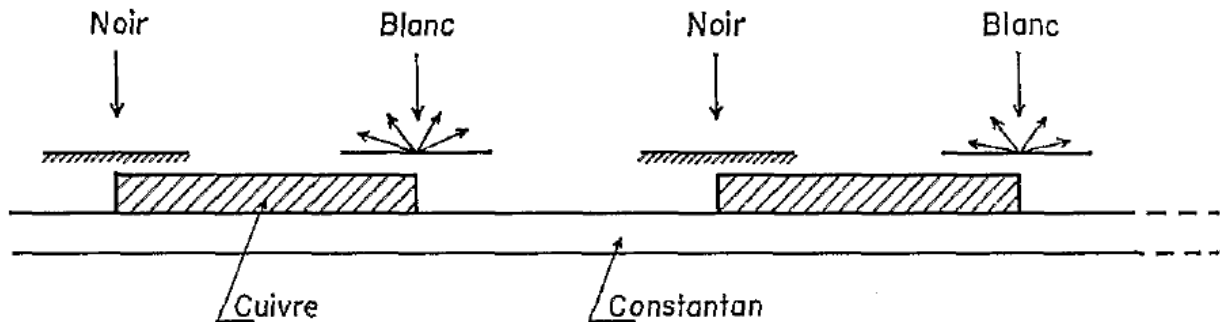
Pyranomètre c'est l'appareil de base qui mesure tous les types de rayonnements solaires, c'est-à-dire direct et diffus parvenant depuis toutes les directions sur une surface plane (le plus souvent horizontale et orientée face au zénith). Il suffit d'équiper un pyranomètre d'une bande pare-soleil pour obtenir une mesure du rayonnement solaire diffus.

### **2.1.2. Principe de fonctionnement du pyranomètre [11]**

Le principe consiste à mesurer l'écart de température entre deux surfaces exposées : l'une noire, absorbant le rayonnement, l'autre blanche le réfléchissant.

Cette mesure est réalisée par un ensemble de thermocouple connecté en série dont les jonctions sont alternativement placées sous la surface noire et sous la surface blanche (Surface réfléchissante).

Les thermocouples sont obtenus par un dépôt électrolytique discontinu de cuivre sur un fil de constantan (fig. 2.2)



**Fig 2.2 : schéma de principe du pyranomètre**

#### **a. Surface noire :**

Surface absorbante c'est-à-dire ayant une absorbance indépendante de  $\lambda$  et égale à l'unité.

#### **b. Thermocouple**

Les thermocouples ou couples thermoélectriques sont, en physique, des couples de matériaux dont l'effet Seebeck est utilisé pour la mesure de température. Leur principal défaut est leur imprécision : il est relativement difficile d'obtenir des mesures avec une erreur inférieure à 0,1 °C - 0,2 °C.

## **2.2. Le solarimètre**

### **2.2.1. Définition**

Un Solarimètre est un dispositif conçu pour déterminer le niveau de rayonnement de l'exposition solaire sur la surface terrestre. L'utilisation principale de cet instrument est dans le domaine des études météorologiques.

Les solarimètres sont placés sur une surface plane où ils peuvent acquérir l'exposition à l'éventail complet des rayonnements électromagnétiques provenant du soleil.

Comme le rayonnement solaire impact sur la surface du globe, les capteurs dans le dispositif de mesurent un rayon complet 180 degrés autour de l'instrument, trouver la densité et les changements dans ce rayonnement. [13]

Solarimètres mesurent uniquement le rayonnement diffus, on ajoute un pare-soleil métallique qui protège le pyranomètre du rayonnement solaire direct. [10]

Il ya aussi deux instruments de Solarimetres défini comme suit :

### **2.2.2. Les instruments chimiques [13]**

Un dispositif de Solarimetre chimiques utilise une solution issue de différents produits chimiques : vert malachite leucocyanide, acide monochloroacétique ou ferrioxalate de potassium. Rayonnement est mesurée entre la lumière absorbée dans un processus appelé identification de rendement quantique. De cette façon, un Solarimetre est en mesure de déterminer le niveau total de rayonnement électromagnétique, partir du spectre de lumière à la chaleur ayant une incidence sur la surface terrestre.

### **2.2.3. Les instruments physiques [13]**

Un dispositif de Solarimetre utilise des instruments physiques pour identifier le rayonnement. Il s'agit de bolomètres, photodiodes et thermopiles.

- ❖ Bolomètres sont les plus fondamentaux, à l'aide d'un morceau de métal raccordé à un dissipateur de chaleur qui permet des variations de température à être identifié.
- ❖ Photodiodes sont des modèles plus modernes, utilisant le concept de l'énergie solaire pour transférer l'énergie lumineuse à un courant électrique, à mesurer le niveau de rayonnement.

- ❖ De même, les thermopiles sont capables de conversion de chaleur en courant électrique, qui conclut également le niveau de radiation.

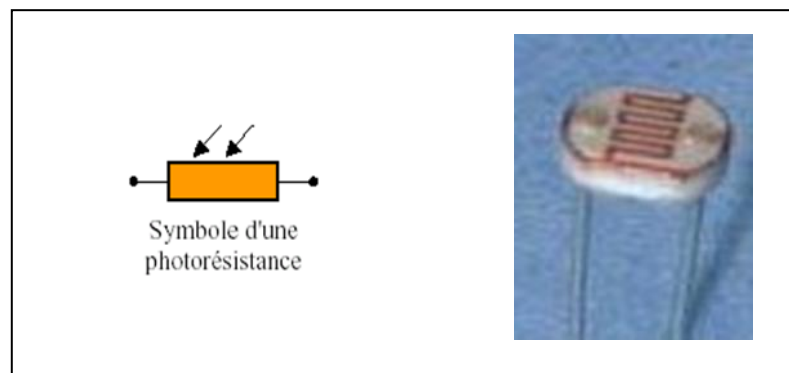
#### **2.2.4. Informations très importants**

- ❖ Solarimètres dépendent fortement de la position réelle du soleil afin d'obtenir la meilleure lecture possible. Lorsque le rayonnement solaire est provenant de son apogée, directement au-dessus de l'appareil, les lectures sont infaillibles et facilement identifiables. Toutefois, entre les angles de 0,5 et 60 degrés, une détermination proportionnelle doit être faite.
- ❖ Si le soleil est positionné à 90 degrés ou plus, aucune lecture ne peut être mesurée.
- ❖ Tous les appareils de la mesure l'irradiance ont besoin de capteurs, c'est pour ça on propose quelques types.

### **2.3. Capteurs du rayonnement solaire**

Aussi, plusieurs capteurs d'éclairement sont utilisés pour la mesure de l'irradiance solaire dont on peut citer les photorésistances, les photodiodes et les cellules solaires...etc.

#### **2.3.1. La photorésistance**



**Fig 2.3 :** photorésistance

Une photorésistance est un composant électronique dont la résistivité varie en fonction de la quantité de lumière incidente, et s'est composée d'un semi-conducteur [6].

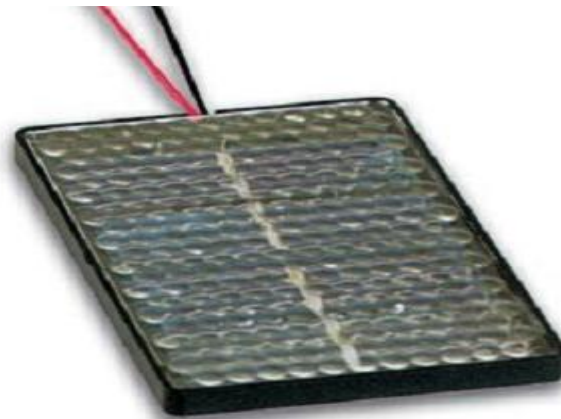
### 2.3.2. La photodiode



**Fig 2.4 :** photodiode

Une photodiode est un composant semi-conducteur ayant la capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique.

### 2.3.3. La cellule solaire



**Fig 2.5 :** cellule solaire

Une cellule solaire au silicium peut être utilisée comme un élément de mesure du rayonnement solaire. La quantité du courant fournit par une cellule solaire ou photovoltaïque dépend fortement de la quantité du rayonnement solaire incident sur la cellule. [17]

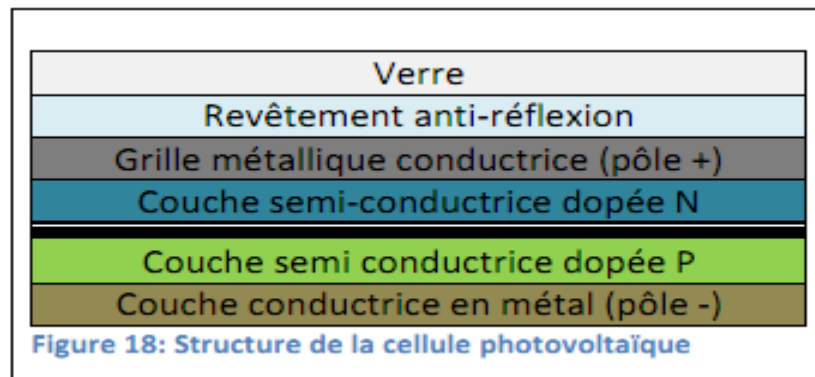
Dans la suite de ce chapitre nous détaillerons plus le fonctionnement de la cellule solaire ; qui sera l'élément de base de notre réalisation.

### 3. les cellules photovoltaïques

Plusieurs types de cellule solaire existent, nous présentons ici la cellule solaire à base de silicium monocristallin.

#### 3.1. Définition

Une cellule photovoltaïque transforme l'énergie solaire en énergie électrique [2]. Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons) produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté. La tension obtenue est fonction de la lumière incidente. La cellule photovoltaïque délivre une tension continue [6].



**Fig 2.6 :** structure de la cellule photovoltaïque

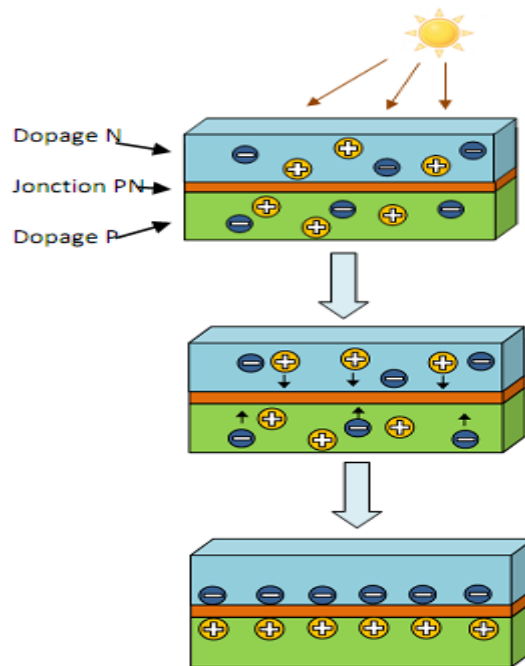
#### 3.2. Principe de fonctionnement

La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de Silicium (matériau semi-conducteur) [5]:

- une couche dopée avec du Bore qui possède moins d'électrons que le Silicium, cette zone est donc dopée positivement (zone P).
- une couche dopée avec du Phosphore qui possède plus d'électrons que le Silicium, cette zone est donc dopée négativement (zone N).
- Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P



et les électrons, chargés négativement, dans la zone N. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée.



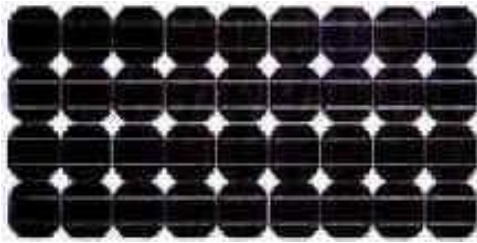
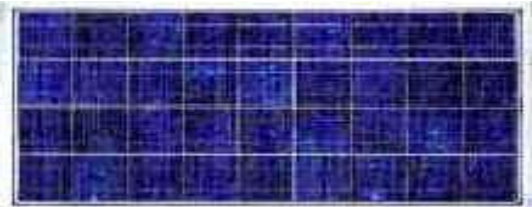

**Fig 2.7 :** Principe de fonctionnement de la cellule

En somme, une cellule photovoltaïque est l'équivalent d'un générateur de courant auquel on a adjoint une diode.

Il faut ajouter des contacts électriques (qui laissent passer la lumière en face éclairée : en pratique, on utilise un contact par une grille), une couche antireflet pour assurer une bonne absorption des photons,..., etc [6].

Pour que la cellule fonctionne, et produise le maximum de courant, on ajuste le gap (bande interdite) du semi-conducteur au niveau d'énergie des photons. On peut éventuellement empiler les jonctions, de façon à exploiter au mieux le spectre d'énergie des photons, ce qui donne les cellules multi-jonctions.

### **3.3. Les cellules a base de silicium sont regroupées en 3 grandes familles [4]:**

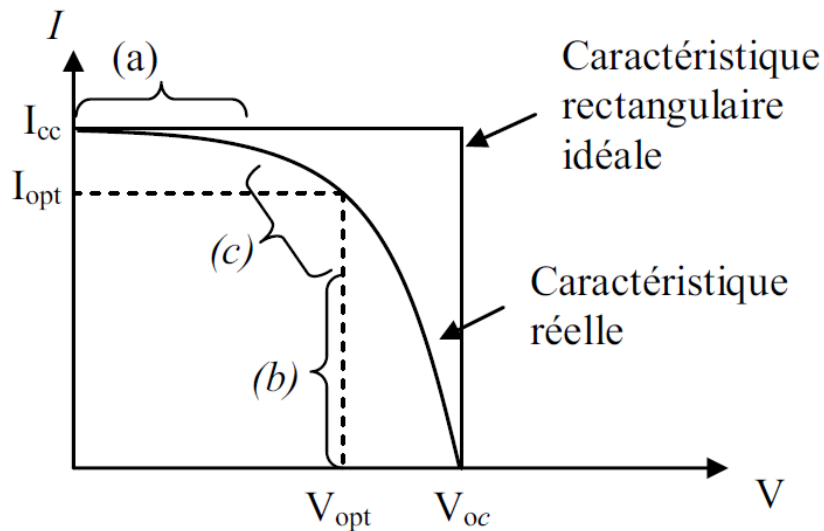
<p><b>Les cellules monocristallines :</b></p> <p>Elles sont conçues à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal et sont reconnaissables à leur couleur uniforme et à leurs formes rondes ou quasi-octogonales. Elles sont les plus performantes avec un rendement de 13 à 20 %.</p>	
<p><b>Les cellules polycristallines :</b></p> <p>Elles sont conçues à partir d'un bloc de silicium cristallisé suivant plusieurs cristaux à orientation différente. Leur couleur n'est pas uniforme. Leur rendement est de 12 à 15 % mais leur fabrication est moins onéreuse.</p>	
<p><b>Les cellules amorphes :</b></p> <p>Elles sont conçues à partir de couches minces de silicium appliquées par vaporisation sur du verre, du métal ou du plastique souple. Les coûts de production sont faibles mais le rendement n'est que de 5 à 9 %.</p>	

### **3.4. Paramètres essentiels caractérisant une cellule solaire**

#### **3.4.1. Caractéristiques I(V)**

La capacité d'une cellule à produire de l'énergie est mesurée grâce à sa caractéristique courant-tension (Fig 2.8).

On peut facilement obtenir à partir de cette caractéristique certains paramètres qui vont nous renseigner sur les phénomènes physiques mis en jeu dans la cellule [19].



**Fig 2.8 :** Caractéristique courant-tension ( $I = f(V)$ ).

La caractéristique se divise en trois parties : [20]

- La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant  $I_{cc}$  proportionnel à l'éclairement,
- La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension  $V_{co}$ ,
- La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

#### **3.4.2. Le courant de court-circuit $I_{cc}$**

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule, de la mobilité des porteurs et est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue [19].

### **3.4.3. La tension de circuit ouvert $V_{co}$**

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [20].

$$V_{CO} = \frac{KT}{e} \ln \left( \frac{I_{CC}}{I_s} + 1 \right) \quad (2.1)$$

### **3.4.4. Schéma équivalent d'une cellule et calcule le courant**

Le modèle mathématique associé à une cellule se trouve à partir de celui d'une jonction PN. On y ajoute le courant  $I_{ph}$ , proportionnel à l'éclairement, ainsi qu'un terme modélisant les phénomènes internes [3]. Le courant  $I$  issu de la cellule s'écrit alors :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2.2)$$

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

$$I_d = I_s \left( e^{\frac{q(V + R_s I)}{KT}} - 1 \right) \quad (2.4)$$

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{q(U + R_s I)}{KT}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (2.5)$$

Avec :

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

$V$  : Tension à la borne de la cellule [V]

$I_{ph}$  : photo-courant, ou courant généré par l'éclairement (A)

$I_s$  : courant de saturation de la diode (A)

$R_s$  : résistance série (W)

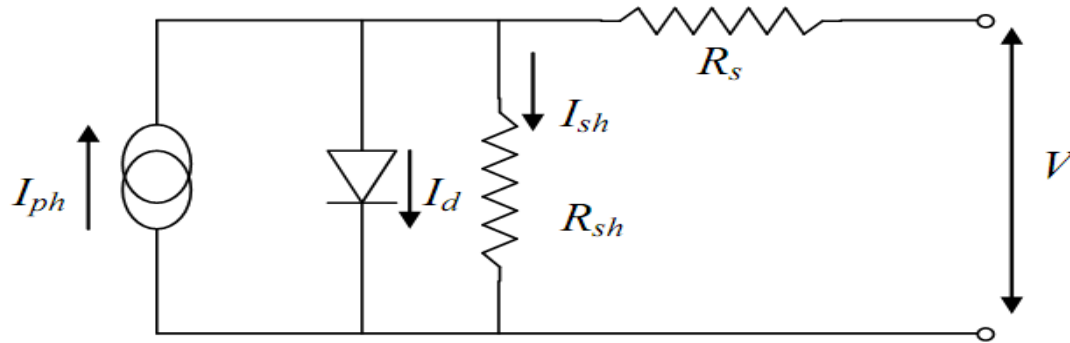
$R_{sh}$  : résistance shunt (W)

$K$  : constante de Boltzmann ( $k = 1,38.10^{-23}$ )

$q$  : charge de l'électron ( $q = 1,602.10^{-19}c$ )

$T$  : température de la cellule (°K)

On peut déduire de l'ensemble de ces expressions le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque, comme le montre la figure 2.9 : [3]



**Fig 2.9:** Schéma équivalent d'une cellule PV (Modèle à une diode).

- La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité.
- Le générateur de courant modélise le courant  $I_{ph}$  généré par un éclairage.
- Enfin, les deux résistances modélisent les pertes internes :
  - Résistance série  $R_s$  : modélise les pertes ohmiques du matériau.
  - Résistance shunt  $R_{sh}$  : modélise les courants parasites qui traversent la cellule.

Le courant photo-généré  $I_{ph}$  est dépendant de la quantité du rayonnement solaire, il est donnée par :

$$I_{ph} = \frac{\Phi}{\Phi_{ref}} \cdot [I_{ph\ ref} + \mu_{Ics} \cdot (T - T_{ref})] \quad (2.6)$$

Où :

$\Phi$  et  $\Phi_{ref}$  : Irradiance effective et de référence [ $W/m^2$ ].

$T$  et  $T_{ref}$  : Température effective et de référence [K].

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

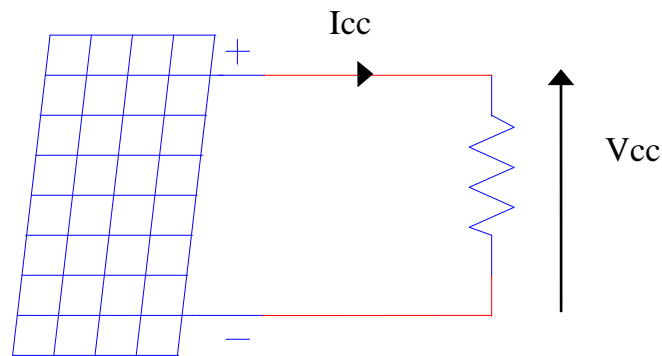
Les conditions de référence  $\Phi$  et  $\Phi_{ref}$  sont les conditions extérieures pour lesquelles sont spécifiées les données de base utilisées pour l'établissement du modèle ( $V_{co}$ ,  $I_{cc}$ ), se sont soit les spécifications du fabricant données aux conditions de test standard STC (Standard Test Conditions,  $1000\ W/m^2$ ,  $25^\circ C$ , spectre AM1,5), soit des valeurs issues d'une mesure du module. [12]

Cette dernière expression nous renseigne sur la façon dont on va utiliser la cellule photovoltaïque pour la mesure de l'éclairement.

#### 4. Mesure de l'irradiance avec une cellule photovoltaïque

Dans les paragraphes précédents nous avons vu que le photo-courant est proportionnel à l'irradiance incidente sur la cellule photovoltaïque.

Mais une configuration de la cellule est indispensable pour l'utilisation de la cellule comme un capteur de l'irradiance. Nous allons mettre la cellule en court-circuit, ou en parallèle avec une résistance shunt de faible valeur.



**Fig 2.10:** Cellule PV en court-circuit

Dans ce cas de figure, les équations décrivant le modèle de la cellule photovoltaïque se simplifie telle que :

Lors du court-circuit la tension  $V_{cc}$  devient nulle, l'équation 2.3 devient :

$$I_{sh} = \frac{R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (2.7)$$

Selon les caractéristiques de la cellule PV utilisée, nous avons généralement

$$R_s < 1 \text{ et } R_{sh} > 100 \quad \text{ceci donne } I_{sh} \approx 0 ;$$

Le courant de diode représente le courant d'obscurité, dans ce cas on le prend comme étant nul.

Reste le photo-courant  $I_{ph}$  qui varie avec l'irradiance, il est déterminé par l'équation 2.6 ; il est égale au courant de court-circuit.

$$I = I_{cc} = I_{ph} = \frac{\Phi}{\Phi_{ref}} \left[ I_{ph_{ref}} + \mu_{Ics} (T - T_{ref}) \right]$$

Le courant  $I_{ph_{ref}}$  est le même courant de court-circuit donnée par le constructeur de la cellule PV dans les conditions STC.

Par exemple, nous avons pris les valeurs constantes suivant qui correspondent à la cellule PV que nous devons utilisée ;

$$\Phi_{ref} = 1000 \text{w/m}^2 \quad T_{ref} = 293^\circ\text{K} \quad \mu_{Ics} = 0.5\%/K \quad I_{ph_{ref}} = 3.6\text{A}$$

Nous aurons alors l'irradiance en fonction de la température et du courant de court-circuit selon l'équation suivante :

$$E_G = 1000 * \frac{I_{cc}}{3.6 + 0.005 * (T - 293)}$$

Cette équation nous ramène à mesurer le courant de court-circuit et la température de la cellule pour estimer l'irradiance.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail les principes de fonctionnement de quelques appareils de mesure du rayonnement solaire, ainsi qu'une que les éléments de capture qui permettent de quantifier l'irradiance globale et diffuse.

Dans une seconde partie du chapitre, nous avons détaillé le fonctionnement de la cellule solaire, qui sera notre organe de mesure dans le solarimètre que nous devons réaliser.

