



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Electrotechnique  
Machine Electrique

Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :  
**MAATOUGUI Abdelfatah**

Le : lundi 8 juillet 2019

## Simulation d'une station PV Hybride

---

### Jury :

Dr. Alloui lotfi	Pr	Université de biskra	Rapporteur
Dr. Rezig Mohamed	MCB	Université de biskra	Président
Dr. KHENE Mohamed Lotfi	MCA	Université de biskra	Examineur

Année universitaire : 2018 - 2019



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Electrotechnique  
Machine Electrique

---

Présenté et soutenu par :

**MAATOUGUI Abdelfatah**

Le : lundi 8 juillet 2019

## Simulation d'une station PV Hybride

---

Présenté par :

**MAATOUGUI Abdelfatah**

Avis favorable de l'encadreur :

**Pr. Alloui lotfi**

*signature*

### Avis favorable du Président du Jury

**Dr. Rezig Mohamed**

*Signature*

Cachet et signature

## ***Remerciements***

Je remercie tous d'abord « ALLAH » de m'avoir donné le courage ainsi que la force pour pouvoir finir ce modeste travail.

Je remercie infiniment «Professeur ALLOUI Lotfi», de m'avoir encadrés, pour sa constante disponibilité, son aide, encouragements et sa pris en charge, pour ses conseils et orientations, malgré le plan de charge qu'il s'occupe.

Je remercie Mr : REZIGUE MOUHAMED (MCB à l'université de Biskra) d'avoir accepter de présider ma soutenance de master, et Mr: Khene Mohamed Lotfi (MCA à l'université de Biskra). Pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie aussi tous les enseignants du département d'Electrotechnique qui ont contribué à notre formation.

## *Dédicaces*

Je dédie ce mémoire à mes très chers parents et ma petite famille, ma femme et mes enfants (Hacen, Sohaib, Ishak, Oumaima ) que je demande au dieu de les protégés et soutenues au longue de leur vie. A mes collègues de travail ainsi mes amis de classe pour leur encouragements et leur soutien moral ; vu la grande durée de coupure d'étude qui est presque 18 dix huit ans.

Et à tous mes amis.

**MAATOUGUI ABDEL FATAH**

Liste des figures

Chapitre I

**Figure I.1** : Deux exemples de modules concentration thermodynamique.....4

**Figure I.2** : Deux exemples de modules thermiques.....4

**Figure I.3**: Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique.....5

**Figure I.4** : Composition d'un panneau solaire thermique.....5

**Figure I.5** : Les cellules photovoltaïque .....7

**Figure I.6** : Dopage de type P.....9

**Figure I.7** : Dopage de type P.....9

**Figure I.8**: La Jonction PN.....10

**Figure I.9** : Distance Terre-Soleil.....14

**Figure I.10** : Heure de puissance crête.....15

**Figure I.11** : Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome.....16

**Figure I.12** : Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau.....17

Chapitre II

**Figure II .1** : Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale connectée à une charge.....19

**Figure II.2** : Caractéristique I/V d'une cellule PV .....21

**Figure II.3**: Courbe de puissance et MPP d'une cellule PV.....22

**Figure II.4** : Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle connectée à une charge.....23

**Figure II.5** : Caractéristique I/V pour différentes valeurs de  $R_s$  .....24

**Figure II.6** : Caractéristique I/V pour différentes valeurs de  $R_p$ .....24

**Figure II.7 :** Schéma du circuit électrique équivalent simplifié d'une cellule PV réelle.....25

**Figure II.8 :** Caractéristique I/V pour différents niveaux de rayonnement.....27

**Figure II.9 :** Variations de courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de l'irradiance.....28

**Figure II.10 :** Caractéristique I/V pour différentes températures.....29

**Figure II.11 :** Influence de l'éclairement solaire.....30

**Figure II.12 :** Influence de la température.....30

### Chapitre III

**Figure III.1 :** Systèmes d'exploitation de l'énergie solaire.....32

**Figure III.2 :** Conditions aux limites imposées sur les frontières du problème à résoudre...37

**Figure III.3.** Profil bidimensionnel de la température sur le premier niveau du panneau.....39

**Figure III.4.** Profil bidimensionnel de la température sur le second plan placé en dessous du niveau supérieur du panneau.....40

**Figure III.5.** Profil bidimensionnel de la température sur le second plan placé en dessous du niveau supérieur du panneau.....41

**Figure III.6.** Profil bidimensionnel de la température sur le second plan placé en dessous du niveau supérieur du panneau.....43

**Figure III.7.** Profil bidimensionnel de la température sur le second plan placé en dessous du niveau supérieur du panneau.....44

## Liste des symboles

FF	Facteur de Forme
G	Eclairement
I <sub>cell</sub>	Courant délivré par la cellule
V <sub>cell</sub>	Tension aux bornes de la cellule
I <sub>D</sub>	Courant diode
I <sub>load</sub>	Courant à travers la charge
I <sub>MPP</sub>	Courant au MPP
I <sub>ph</sub>	Photo courant
I <sub>s</sub>	Courant de saturation
I <sub>sc</sub>	Courant de court circuit
k	Constante de Boltzmann
K	Gain
n	Facteur d'idéalité de la jonction
P	Puissance
P <sub>in</sub>	Puissance fournie par le Soleil
P <sub>max</sub>	Puissance maximale
P <sub>MPP</sub>	Puissance au MPP
P <sub>sol</sub>	Puissance du rayonnement solaire
q	Charge électrique élémentaire
R <sub>p</sub>	Résistance parallèle
r <sub>pv</sub>	Résistance dynamique
R <sub>s</sub>	Résistance série
T	Température absolue de la cellule
T <sub>C</sub>	Température de fonctionnement de la cellule
V <sub>bat</sub>	Tension aux bornes de la batterie

## Liste des symboles

---

Vload Tension aux bornes de la charge

VMPP Tension au MPP

Voc Tension de circuit ouvert

Vth Tension thermique

$\rho$  Masse volumique [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]

$\vec{q}$  Sources des flux de conduction [ $\text{W}/\text{m}^2$ ], donnée par  $\vec{q} = -k \text{ grad } T$

# **Sommaire**

Sommaire

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur L'énergie solaire</b>	
<b>I.1. INTRODUCTION SUR L'ENERGIE SOLAIRE .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2.CONVERSION D'ENERGIE : LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES SOLAIRES.....</b>	<b>3</b>
<b>I.2.1. solaire à concentration thermodynamique .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2.2. <i>Solaire thermique</i> .....</b>	<b>4</b>
<b>I.2.3. Solaire photovoltaïque.....</b>	<b>6</b>
<b>I.2.3.1. L'énergie solaire photovoltaïque .....</b>	<b>6</b>
<b>I.3. LES CELLES PHOTOVOLTAÏQUES. ....</b>	<b>7</b>
<b>I.3.1. Historique.....</b>	<b>7</b>
<b>I.3.2. Principe de fonctionnement d'une cellule.....</b>	<b>8</b>
<b>I.3.3. Type de cellules.....</b>	<b>11</b>
<b>I.3.4. Performances .....</b>	<b>12</b>
<b>I.3.5. utilisation.....</b>	<b>12</b>
<b>I.3.6.Conclusion .....</b>	<b>14</b>
<b>I.4. L'ENERGIE SOLAIRE ET LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES. ....</b>	<b>14</b>
<b>I.4.1. Introduction.....</b>	<b>14</b>
<b>I.4.2. Caractéristique de rayonnement solaire.....</b>	<b>14</b>
<b>I.4.3. Les différents types de systèmes photovoltaïques.....</b>	<b>15</b>
<b>I.4.3.1. Alimentations électriques faibles puissances.....</b>	<b>15</b>
<b>I.4.3.2. Installations électriques photovoltaïques autonomes .....</b>	<b>15</b>

I.4.3.3. Installations ou centrales électriques photovoltaïques raccordées au réseau.....	16
I.4.3.4. Installations ou centrale électriques photovoltaïques hybrid.....	17
<b>I.5. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE.....</b>	<b>17</b>
<b>Chapitre II : Description théorique et modélisation de la cellule PV</b>	
<b>II.1 DESCRIPTION THEORIQUE ET MODELISATION DE LA CELLULE PV.....</b>	<b>19</b>
II.1.1 Cellule Pv idéale – modèle simple.....	19
II.1.2 Cellule PV réelle –modèle précis.....	22
II.1.3 Effets des variations climatiques sur la cellule photovoltaïques .....	27
II.1.3.1 Variations de l'énergie incidente .....	27
II.1.3.2. Variations de la température.....	28
II.2. Simulation de la cellule photovoltaïque . .....	29
II.3. Conclusion.....	30
<b>Chapitre III : Simulation thermique d'un panneau PV hybride</b>	
III .1. Introduction .....	31
III.2. LE PANNEAU SOLAIRE HYBRIDE.....	31
III.2.1. Types de systèmes solaires hybrides.....	33
III.2.1.1. L'aerovoltaïque (PVm-T AIR ) .....	33
III.2.1.2. Les capteurs solaires hybrides à eau .....	33
III.3.AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU MIXTE PHOTOVOLTAÏQUE / THERMIQUE .....	33
III.3.1. Les Avantages.....	34

**III.3.2. Les incontinents .....34**

**III.4. MODELE MATHEMATIQUE .....34**

**III.5. RESULTATS DES SIMULATIONS REPRESENTANT LA  
TEMPERATURE DE CHAQUE COUCHE .....36**

**III.6 CONCLUSION.....45**

**Biographie**

# **INTRODUCTION G E N E R A L E**

## INTRODUCTION GENERALE

L'énergie électrique est l'un des facteurs les plus importants dans la société moderne, définit la disponibilité d'une énergie moins chère et plus écologique dans le monde entier un défi central, dont la maîtrise a le potentiel à résoudre certains des problèmes les plus importants de l'humanité. L'expansion de l'utilisation de l'énergie renouvelable est une étape logique dans l'utilisation durable des ressources disponibles. Comme dans toute autre range technique l'augmentation constante du potentiel de performance à l'énergie solaire est un facteur fondamental pour assurer leur compétitivité. La part de l'énergie solaire dans le bouquet énergétique est l'avenir de l'économie, elle dépend largement de son coût axé sur le marché, leur réduction est à travers l'amélioration des méthodes existantes, pour évaluer le potentiel des nouvelles énergies et la mise en œuvre de l'énergie possible significative.

Les coûts d'installation pour la production d'énergie électrique d'origine solaire n'ont pas encore atteint le niveau des coûts des autres producteurs qui alimentent les réseaux. De ce fait, le coût de production de 1 kWh est encore supérieur au prix moyen de l'électricité en Algérie, en résulte que le photovoltaïque s'est principalement développé jusqu'à maintenant par l'acquisition de petites parts de marché, ou « niches économiques ». Il s'agissait principalement de l'alimentation des consommateurs isolés, non raccordés au réseau, pour les quels l'alternative photovoltaïque était économiquement intéressante. Une partie de ces installations concernent des consommateurs relativement modestes, tels que chalets de week-end, éclairage publique, stations de pompage, signalisation routière et ferroviaire, ...etc. Leur puissance photovoltaïque installée varie entre quelques dizaines et quelques centaines de watts, et le stockage s'effectue habituellement avec des batteries.

Il n'en va plus de même depuis que des préoccupations touchent à la protection de l'environnement et à la conservation des ressources, commencent à intervenir dans le choix des techniques et des énergies de demain. L'énergie photovoltaïque est potentiellement une source d'énergie inépuisable et relativement plus acceptable pour notre environnement [1]. Dernièrement un grand développement à petite échelle d'énergies renouvelables telles que les systèmes solaires thermiques ou photovoltaïques, éoliennes, piles à combustibles ...etc a été enregistré. Cela a conduit à une combinaison des systèmes des différentes sources d'énergies, ces systèmes sont appelées aussi les systèmes hybrides et ils sont utilisés pour fournir

plusieurs besoins énergétiques. Parmi ces différents types de systèmes hybrides, on va étudier dans ce travail le système hybride photovoltaïque thermique appelé le capteur solaire hybride PV/T.

Durant la conversion photovoltaïque du capteur solaire une chaleur est générée ce qui augmentera la température de la cellule photovoltaïque et causera une chute de son Rendement. Ce phénomène est dû à la partie du rayonnement solaire non absorbée par les cellules et qui sera à l'origine de son échauffement. Cet échauffement a été considéré comme néfaste pour le rendement des capteurs solaires .

Photovoltaïques et plusieurs efforts ont été consentis pour évacuer cette chaleur. Il y'a eu aussi l'idée d'exploiter ce phénomène par la combinaison du système photovoltaïque avec un système thermique pour former capteur hybride PV/T qui va générer en même temps de l'électricité et de la chaleur. Le rendement électrique du capteur hybride PV/T pourrait même s'améliorer avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire si un système est placé pour extraire de la chaleur des cellules solaires, ce qui va le refroidir en même temps. L'objectif de notre travail est d'étudier théoriquement UNE STATION hybride à travers la détermination des niveaux des températures de ces différentes couches et ainsi d'étudier l'influence de quelques paramètres sur ses performances électriques et thermiques et enfin de présentera une comparaison avec d'autres configurations existantes. [6]

# *Chapitre I :*

## Généralités sur l'énergie solaire

**I.1. INTRODUCTION SUR L'ENERGIE SOLAIRE**

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

L'électricité photovoltaïque a dans un premier temps été développée pour des applications autonomes sans connexion à un réseau électrique pour par exemple des satellites de télécommunication ou pour des habitations isolées. On la trouve maintenant dans des applications de diverses puissances comme les calculatrices, les montres et d'autres objets d'utilisation courante. En effet, cette électricité produite par des cellules photovoltaïques individuelles peut alimenter diverses charges continues sans difficulté. Plus récemment, avec l'émergence d'installations photovoltaïques connectées au réseau de distribution, le photovoltaïque a connu un développement important en tant que moyen de production d'électricité. Cette évolution constante a été rendue possible grâce aux recherches fondamentales menées dans le domaine des matériaux photovoltaïques, mais aussi par l'amélioration progressive des dispositifs de gestion de cette énergie menée en parallèle. En effet, l'électricité photovoltaïque est une source d'énergie intermittente, à caractère non-linéaire et dépendante de nombreux paramètres comme l'irradiance et la température. Il a donc fallu adapter cette source d'énergie à notre mode de consommation, soit en stockant la production solaire dans des batteries ou dans tout autre moyen de stockage en cours de développement, soit en la renvoyant sur le réseau électrique public [2].

**I.2.CONVERSION D'ENERGIE : LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES SOLAIRES**

Il existe principalement trois façons d'utiliser directement l'énergie solaire :

- La thermodynamique, la thermique et le photovoltaïque.
- **I.2.1. solaire à concentration thermodynamique**

Le solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs qui concentrent l'énergie solaire vers un tube contenant un fluide caloporteur qui chauffe Jusqu'à une température pouvant atteindre 500°C. La chaleur obtenue est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité. L'un des grands avantages de cette technologie provient du fait que la chaleur peut être stockée, permettant ainsi aux centrales solaires de produire de l'électricité pendant la nuit. La centrale ANDASOL 1, à Grenade, a ainsi une autonomie de 7 heures, mais des projets en cours ont comme objectif une autonomie de 20 heures [2]. Les miroirs qui collectent l'énergie solaire

(placés à 3 ou 4 mètres du sol) forment une zone d'ombre sur le sol, cependant il arrive suffisamment de lumière pour cultiver. Des fruits ou des légumes. Une partie de l'eau douce formée sur place par condensation en sortie de turbine, peut être utilisée pour [2].



*Capteurs thermodynamique cylindro-paraboliques*



*Capteurs thermodynamique paraboliques*

**Figure I.1 : Deux exemples de modules concentration thermodynamique.**

### I.2.2. Solaire thermique

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

**Capteur solaire thermique plan**



**Capteur solaire thermique**



**Figure I.2 : Deux exemples de modules thermiques.**

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

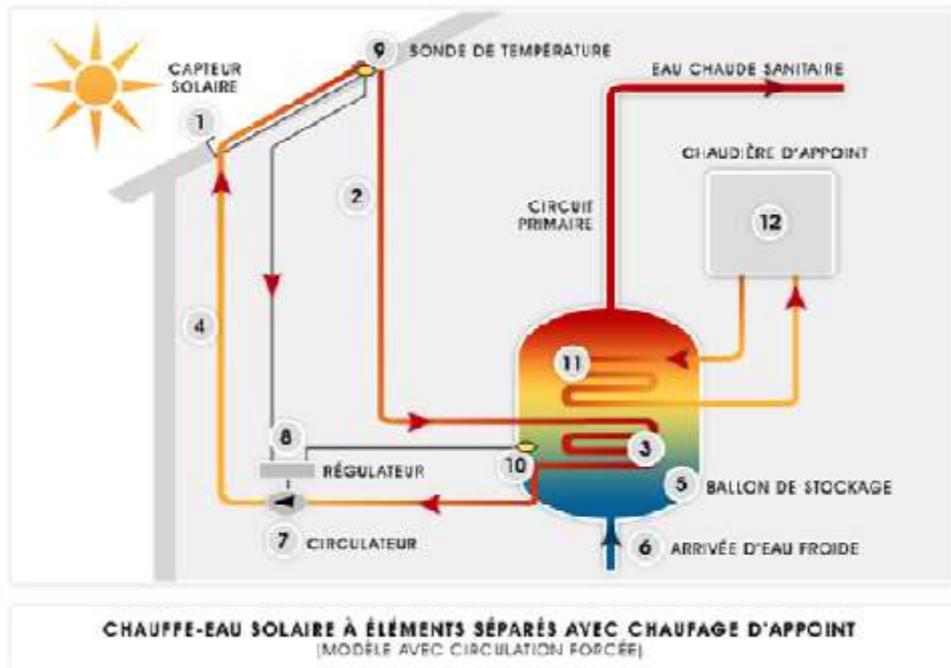


Figure I.3: Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique.

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

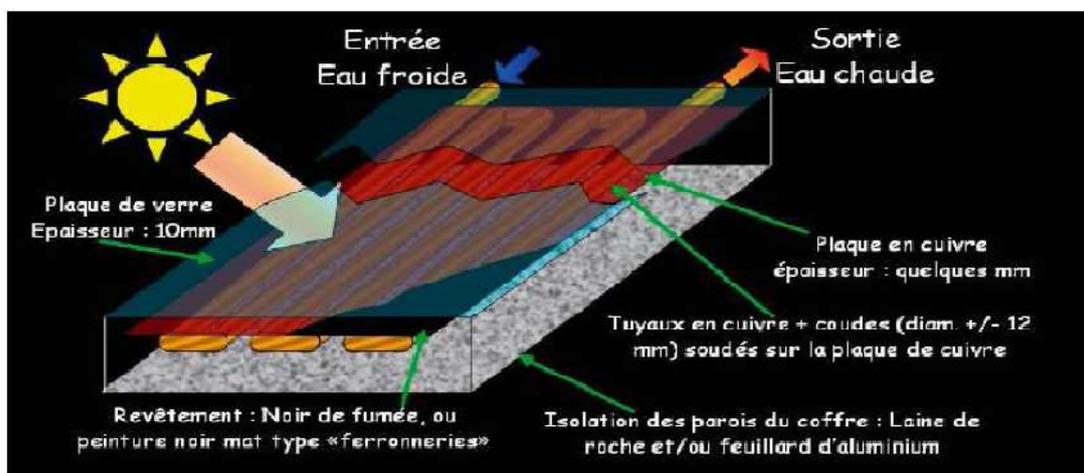


Figure I.4 : Composition d'un panneau solaire thermique

L'énergie thermique utilise la chaleur du rayonnement solaire pour le chauffage de bâtiments ou de l'eau sanitaire. Pour cette dernière il est intéressant de savoir que dans certains pays le chauffage d'eau sanitaire représente environ 20% des dépenses énergétique d'un foyer et que l'énergie solaire thermique peut subvenir à environ 80% de cette dépense énergétique [2].

### **I.2.3. Solaire photovoltaïque**

Contrairement à l'énergie solaire thermique qui utilise le soleil comme source de chaleur, l'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface de la Terre. La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque). Cette transformation (effet photovoltaïque) est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible. L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839. Le mot « photovoltaïque » vient du mot « photo » (du grec « phos » qui signifie « lumière ») et du mot « Volt » (patronyme du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité) [2].

#### **I.2.3.1 L'énergie solaire photovoltaïque**

La technologie photovoltaïque est l'une des technologies les plus prometteuses de l'énergie durable qui peut résoudre les problèmes énergétiques et environnementaux simultanément parce que l'énergie solaire est essentiellement gratuite et illimitée, la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire en énergie électrique se fait avec zéro émission de CO<sub>2</sub>[1].

En 1839, Edmund Becquerel découvre le processus d'utilisation de la lumière pour produire un courant électrique dans un matériau solide, mais il a fallu attendre un siècle plus tard que les scientifiques finalement appris que l'effet photovoltaïque a causé certains matériaux pour convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique. L'effet photovoltaïque est le processus de base principal par le quel une cellule photovoltaïque transforme la lumière du soleil en électricité. Lorsque la lumière brille sur une cellule PV, il peut être réfléchi, absorbée ou passer à travers. La cellule solaire photovoltaïque est un élément électronique comprenant semi-conducteur qui convertit l'énergie de la lumière solaire directement en énergie électrique. Cette conversion est réalisée par une structure de jonction PN en matériau semi-conducteur. Paires électron-trou sont générées dans les semi-conducteurs après l'absorption de l'énergie solaire. En raison de la force du champ électrique dans la région d'espace de charge, les électrons générés seront transportés à l'émetteur (côté, N) et les trous seront transportés vers le fond (côté, P). Les électrons générés sont ensuite recueillis par la métallisation devant et derrière (doigts, barres) [1].

# Les cellules photovoltaïques.



**Figure I.5 : Les cellules photovoltaïques**

## **I.3. LES CELLES PHOTOVOLTAÏQUES.**

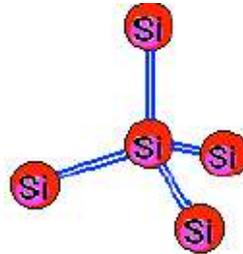
### **I.3.1. Historique**

Découverte de l'effet photovoltaïque. En 1839, Antoine-César Becquerel constate les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile. En 1905, Einstein découvre que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique. L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante. Le domaine spatial a besoin d'une énergie sans combustible embarqué. La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque. En 1954 est créée par les laboratoires BELL la première cellule photovoltaïque avec un rendement de 4%. Le spatial devient le banc d'essai de la technologie photovoltaïque. Les coûts de fabrication élevés des cellules et leurs rendements médiocres ne leur permettent pas encore une exploitation à grande échelle. Il faudra attendre les années 70

pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque [3].

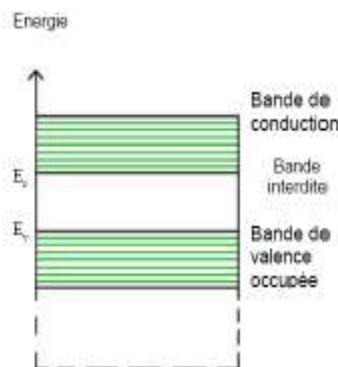
### I.3.2. Principe de fonctionnement d'une cellule

#### - Les matériaux semi-conducteurs :



Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin. Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique.

#### - Les semi-conducteurs intrinsèques:



Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge. Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, ...) Mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre de trou et d'électron est égal [3].

#### - Les semi-conducteurs extrinsèques

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage.

**Dopage de type N :** [3]

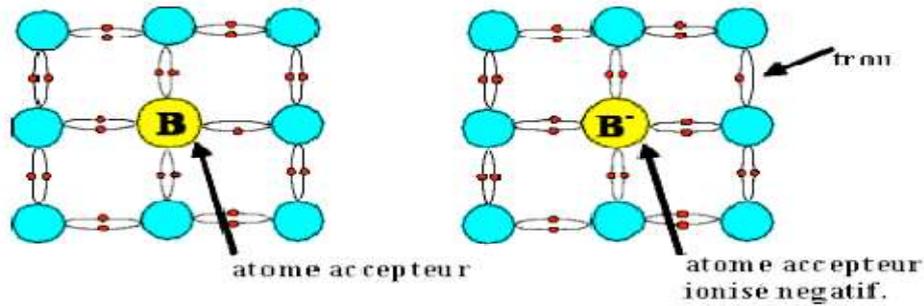


Figure I.6 : Dopage de type N

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent. Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif).

#### Dopage de type P :

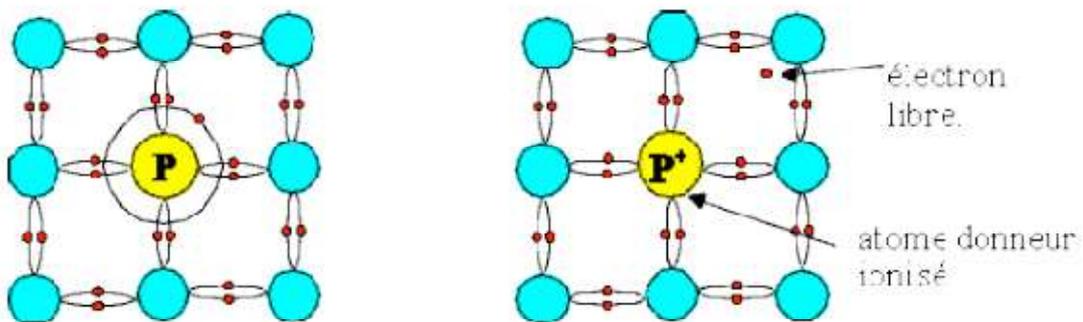


Figure I.7 : Dopage de type P

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant. Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore.

**La jonction PN :**

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopée P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition. Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner [3].

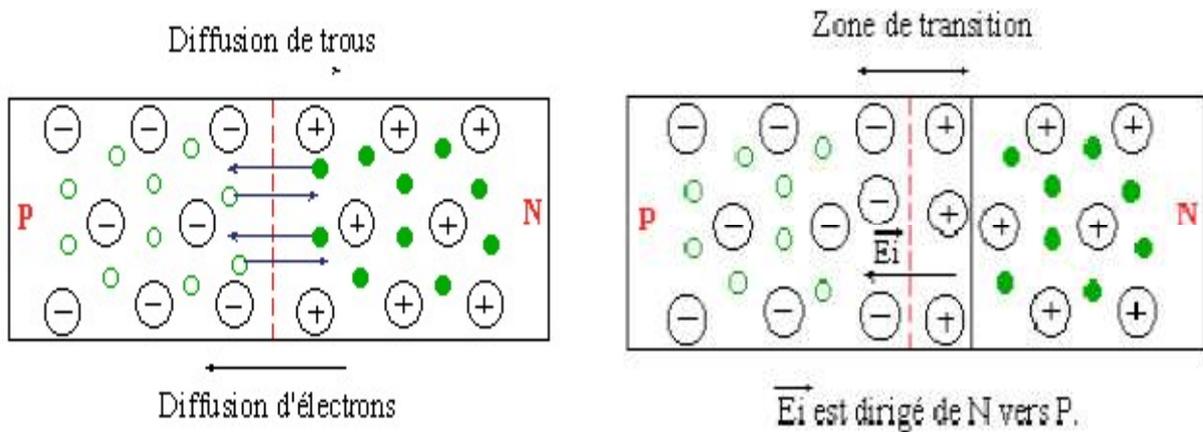
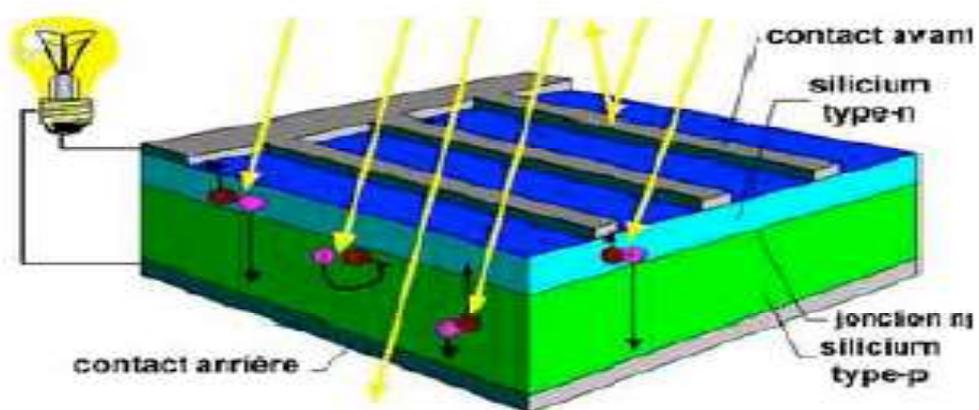


Figure I.8: La Jonction PN

**- L'effet photovoltaïque**

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les photons constituant la lumière « attaquent » les atomes exposés au rayonnement. Les électrons des couches électroniques supérieures, appelés aussi électrons de valence ont tendance à être arrachés. Dans les cellules PV, une partie des électrons ne revient pas à son état initial et les électrons « arrachés » créent une tension électrique continue et faible [3].



### - Association des cellules.

Lorsque l'on associe en série des cellules leur tension s'ajoute, lorsque l'on associe en parallèle des cellules leur courant s'ajoute. Il faut savoir que lorsque l'une des cellules est affectée d'une gêne (ombre..), tout le fonctionnement est perturbé. La tension générée par une cellule est limitée à la valeur du gap de son matériau On associe les cellules afin de pouvoir délivrer des tensions de 12V, 24 V, 48V.

### I.3.3. Type de cellules.

- **Les cellules mono-cristallines** : La première génération de photopiles ; Un taux de rendement excellent (12-16%) (23% en Laboratoire) ; Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère ; Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.

- **Les cellules poly-cristallines** Coût de production moins élevé ; Procédé Nécessitant moins d'énergie ; Rendement 11-13% (18% en Labo) ;



### - Les cellules amorphes

(Cellules de calculatrices par exemple)

Coût de production bien plus bas ;

Rendement plus bas : 8-10% (13% en labo) ;

Durée de vie plus faible ;

C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les produits de consommation comme les calculatrices, les montres etc.... Toutefois, ils réagissent mieux à des températures élevées ou à une lumière diffuse. De plus, les cellules mono et poly-cristallines

sont les types de cellules les plus répandues sur le marché du photovoltaïque (environ 60% de la production).

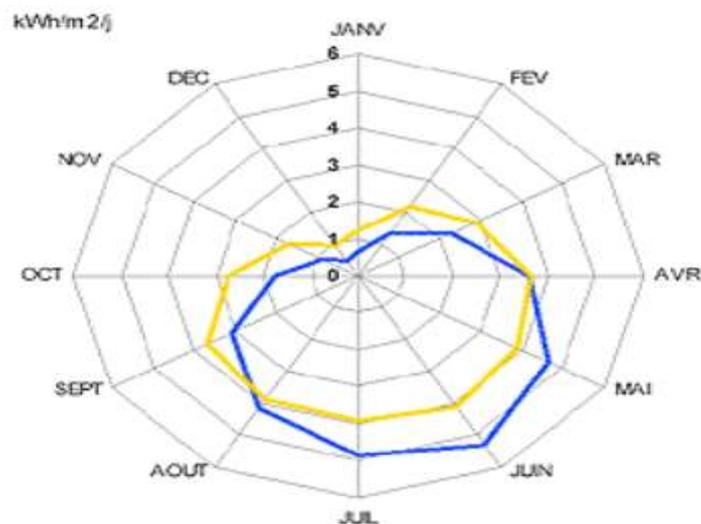
#### - Les cellules nanocristallines

Une des dernières générations de photopiles ; Fonctionnent selon un principe qui différencie les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques ; Rendement global de 10,4 %, confirmé par des mesures au laboratoire ; Procédé et coût de production encore plus bas.

### I.3.4. Performances

#### Caractéristiques d'un panneau

#### Performances



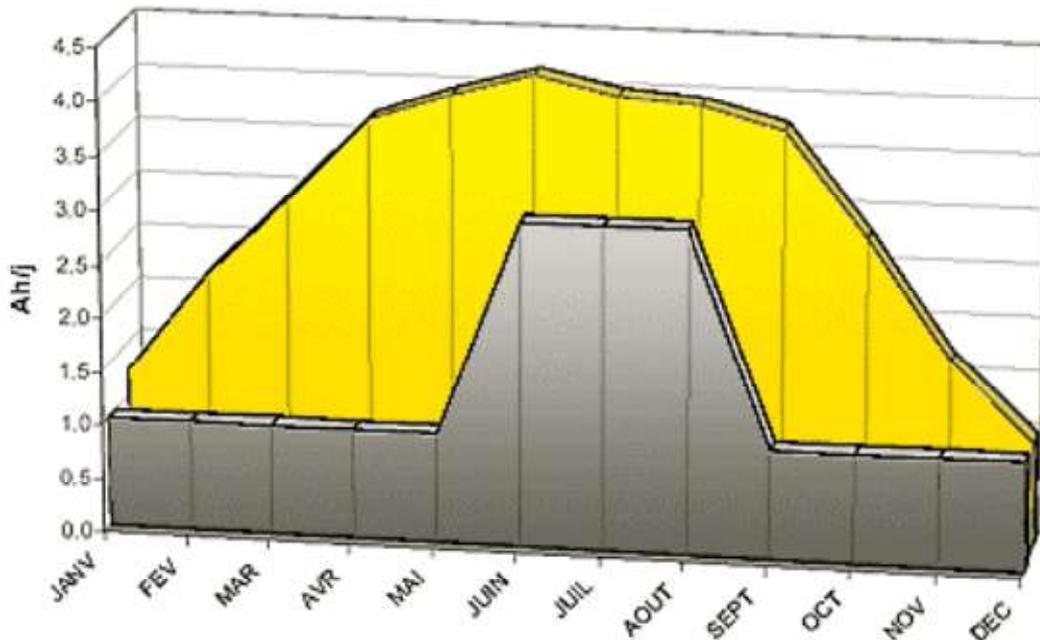
[3].

Schéma : Etude de l'ensoleillement et choix du meilleur angle d'inclinaison

Le rendement d'une cellule PV est le rapport entre l'énergie électrique aux bornes de la cellule et l'énergie incidente (en %). Il dépend essentiellement de la puissance maximale du panneau solaire, de l'intensité de l'ensoleillement, du nombre d'heures d'exposition, de l'angle d'incidence des rayons sur le panneau et de la température. La température extérieure influence le rendement du panneau d'environ 15% ; plus il fait froid et mieux on pourra produire. Le paramètre qui joue le plus est l'angle d'incidence des rayons lumineux : ils doivent arriver perpendiculairement au panneau [3].

#### I.3.5. utilisation.

Les panneaux solaires sont utilisés pour alimenter en électricité des sites isolés et difficiles d'accès, par exemple des régions montagneuses [3].



[3].

Schéma : Estimation de la production en fonction du générateur optimal.

Dans ces cas, il est intéressant d'installer des panneaux solaires car ceux-ci ne demandent que très peu, voir aucun entretien. Les installations qui peuvent être raccordées au réseau sont composées de modules solaires, constitués eux même de cellules photovoltaïques. Ces générateurs transforment directement l'énergie solaire en courant continu. Dans le cas des DOM, on ajoute à l'installation un accumulateur qui permet de stocker l'énergie, ce qui peut être intéressant dans ces régions où le réseau public a parfois des difficultés à alimenter les systèmes (intempéries, cyclones...)[3].

#### - Etude du dimensionnement solaire.

L'énergie fournie par les panneaux solaires est directement proportionnelle à l'ensoleillement. Afin d'optimiser au mieux l'installation il faut donc tenir compte de ce facteur et du lieu de l'installation. Les particuliers qui veulent raccorder leur installation au réseau (**Exemple EDF**) ont deux possibilités : utiliser ce qu'il produise et revendre le reste ou vendre la totalité de la production et acheter l'électricité dont ils ont besoin. La plupart des installations sont garanties 25 ans contre une baisse de rendement de 10%. C'est une des seules choses que les entreprises peuvent garantir car la durée de vie d'un panneau solaire est à ce jour encore inconnue. Les panneaux solaires sont également utilisés pour des applications mobiles (camping-car, bateaux, ...).

### I.3.6. Conclusion

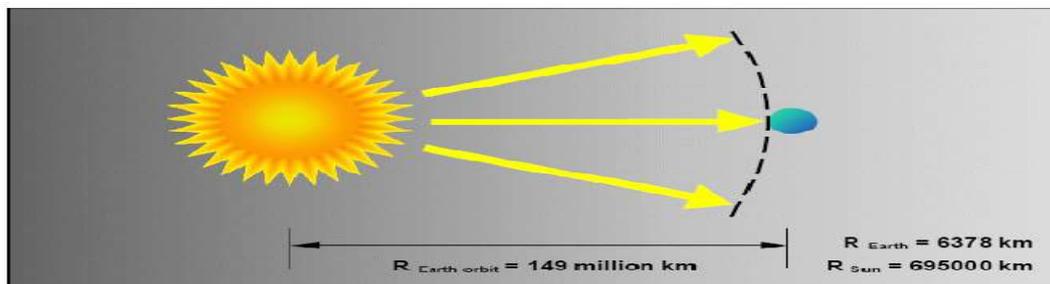
Le PV est en plein essor, elle permet beaucoup d'avantages pour les systèmes isolés. Le rendement a beaucoup augmenté depuis les débuts du PV. Mais aujourd'hui, les chercheurs se tournent davantage vers l'amélioration de la durée de vie des panneaux. Malgré tout, elle ne s'est pas encore imposée comme l'énergie du future [3].

## I.4. L'ENERGIE SOLAIRE ET LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES.

### I.4.1. Introduction

Le Soleil est une grande sphère formée de gaz extrêmement chauds. Il est constitué, par la masse, de 75% d'hydrogène, 23% d'hélium et autres (2%). Les atomes d'hydrogène sont transformés en hélium par une réaction de fusion thermonucléaire massive. La masse est alors transformée en énergie selon la fameuse formule d'Einstein,  $E = mc^2$ . Cette réaction maintient la surface du Soleil à une température approximative de 5800k.

L'énergie du Soleil est transmise sous forme de rayonnement dans l'espace de manière uniforme et dans toutes les directions. Lorsque l'énergie a voyagé 149 millions de kilomètres du Soleil vers la Terre, sa densité extraterrestre totale diminue à  $1367 \text{ W/m}^2$ . Cette valeur est connue sous le nom de constante solaire [4].



**Figure I.9 : Distance Terre-Soleil.**

En une heure, la terre reçoit suffisamment d'énergie du soleil ( $1;21017 \text{ Watts}$ ) pour combler ses besoins pour presque une année. Ce qui fait du soleil une source d'énergie inépuisable. Les panneaux solaires photovoltaïques permettent de profiter de cette énergie gratuite en la transformant en énergie électrique.

### I.4.2. Caractéristique de rayonnement solaire.

L'irradiance est la mesure de la densité de puissance de la lumière du soleil, elle est mesurée en  $\text{W/m}^2$ . L'irradiance est ainsi, une quantité instantanée. La constante solaire correspond à l'irradiance venant du soleil et reçue par la terre au-dessus de l'atmosphère. L'irradiation est la mesure de la densité d'énergie de la lumière du soleil, elle est mesurée en

kWh/m<sup>2</sup> l'irradiation est souvent exprimée en «heures de puissance crête», qui correspond à la durée en heures, à un niveau d'irradiance constant de 1kW/m<sup>2</sup>, nécessaire pour produire l'irradiation quotidienne. Le nombre d'heures de puissance crête est obtenu par intégration de l'irradiance sur toutes les heures de clarté (figure 1.7). La connaissance de cette valeur permet de quantifier rapidement les possibilités offertes par le générateur solaire. Un module de 50Wc fournira 150WhH dans un site correspondant à un ensoleillement de 3 heures de puissance crête. L'irradiance et l'irradiation dépendent de l'emplacement, des conditions climatiques et de la période de l'année. Elles dépendent aussi de l'ombre des arbres et des bâtiments qui pourrait exister et de l'inclinaison de la surface. Dans le cadre de l'utilisation des panneaux photovoltaïques, il serait utile de pouvoir déterminer avec exactitude, la durée d'insolation à un endroit particulier en un jour précis [4].

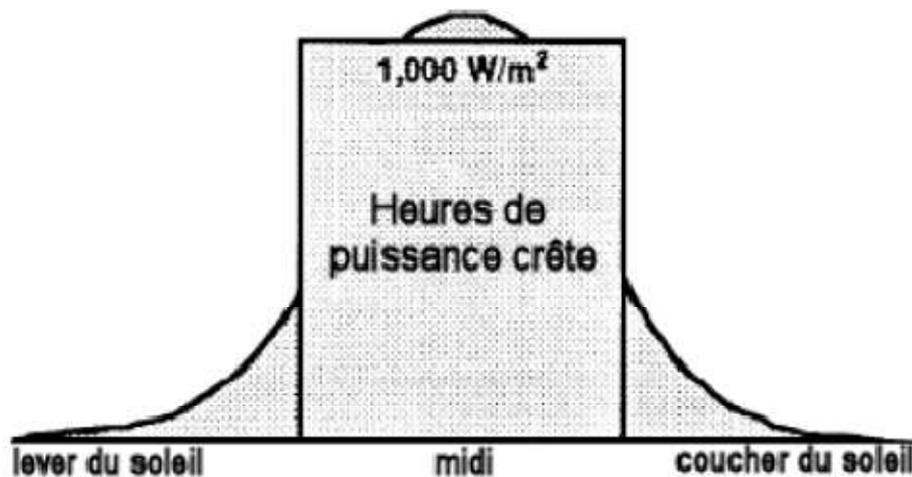


Figure I.10 : Heure de puissance crête. [4]

### I.4.3 Les différents types de systèmes photovoltaïques [4].

#### I.4.3.1. Alimentations électriques faibles puissances.

Il s'agit des alimentations électriques faibles telles que les calculettes ou les chargeurs de piles. Des modules photovoltaïques (PV) peuvent faire fonctionner n'importe quel appareil alimenté par des piles.

#### I.4.3.2. Installations électriques photovoltaïques autonomes.

En site isolé, le champ photovoltaïque (1) (figure 1-8) peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique). Un système de régulation (2) et une batterie (3) d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique qui sera ensuite utilisée en l'absence du Soleil. Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon

ses caractéristiques. Le régulateur de charge (2) a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie. En site isolé, on peut aussi utiliser des récepteurs fonctionnant en courant alternatif (6). Dans ce cas, l'installation comprendra un onduleur (4). On peut citer quelques exemples de systèmes autonomes, comme les balises en mer, les lampadaires urbains, le pompage solaire et les maisons en sites isolés [4].

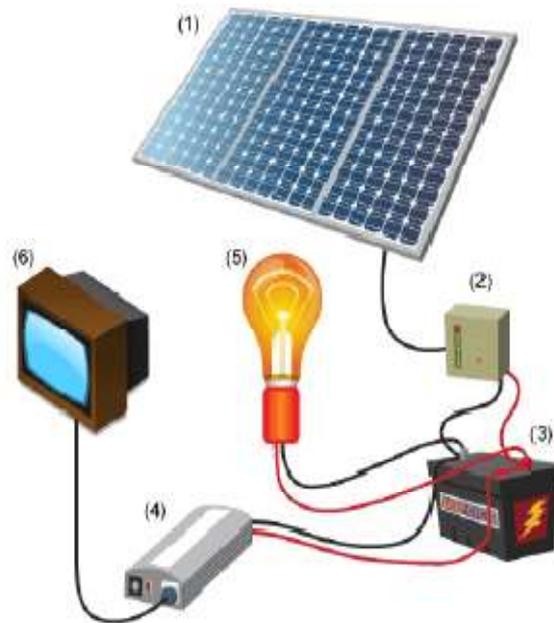


Figure I.11 : Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome. [4]

#### I.4.3.3. Installations ou centrales électriques photovoltaïques raccordées au réseau.

Un générateur photovoltaïque connecté au réseau n'a pas besoin de stockage d'énergie et élimine donc le maillon le plus problématique (et le plus cher) d'une installation autonome. C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie. Deux compteurs d'énergie sont nécessaires : un compteur comptabilise l'énergie achetée au fournisseur d'énergie et un autre compteur mesure l'énergie renvoyée sur le réseau électrique l'énergie produite est injectée en intégralité dans le réseau (compteur de non-consommation) [4].

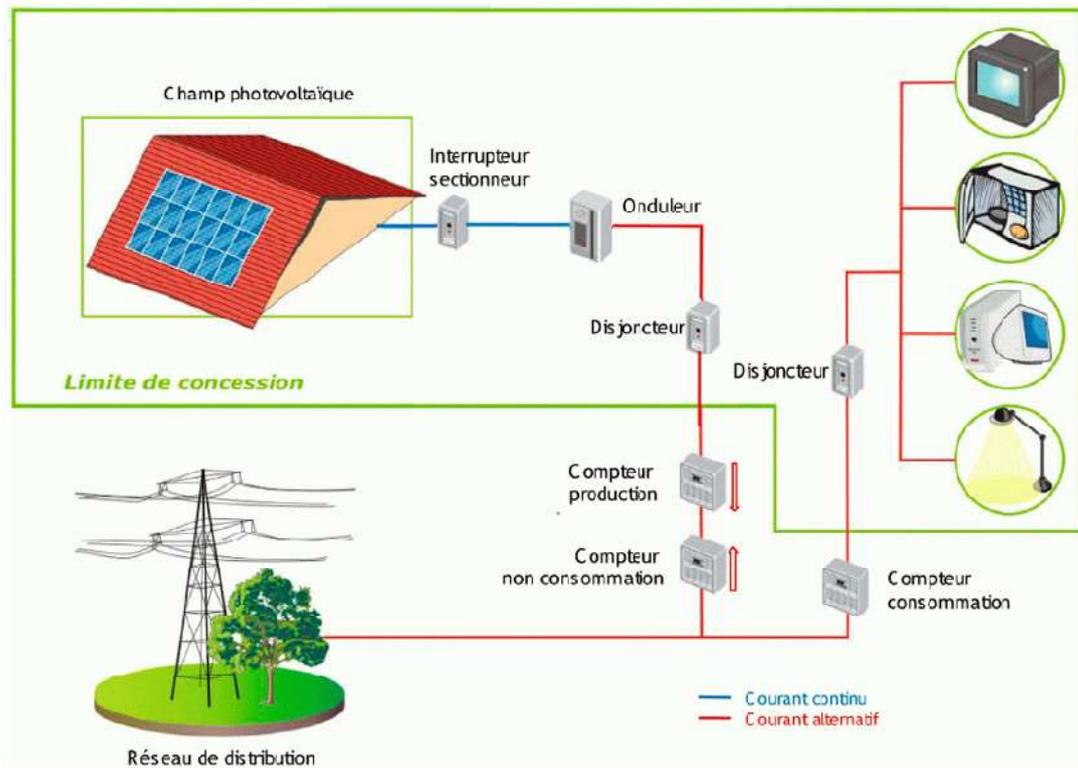


Figure I.12 : Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau. [4]

#### I.4.3.4. Installations ou centrales électriques photovoltaïques hybride

Il s'agit de systèmes qui regroupent des sources d'énergie de nature différentes tels une installation éolienne, un générateur diesel ou une centrale de cogénération en plus du générateur photovoltaïque. Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque seul ne couvre pas toute l'énergie requise.

### I.5. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE [4].

- **Les principaux avantages de l'énergie photovoltaïque sont :**
  - Sa gratuité. - Pas de pollution.
  - Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
  - Sa structure fixe.
  - Son coup de maintenance bas.
  - Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
  - L'installation ne produit aucun bruit.
  - Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière
- **Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque sont :**

- Le coût élevé de l'installation
- .- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.
- Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement.

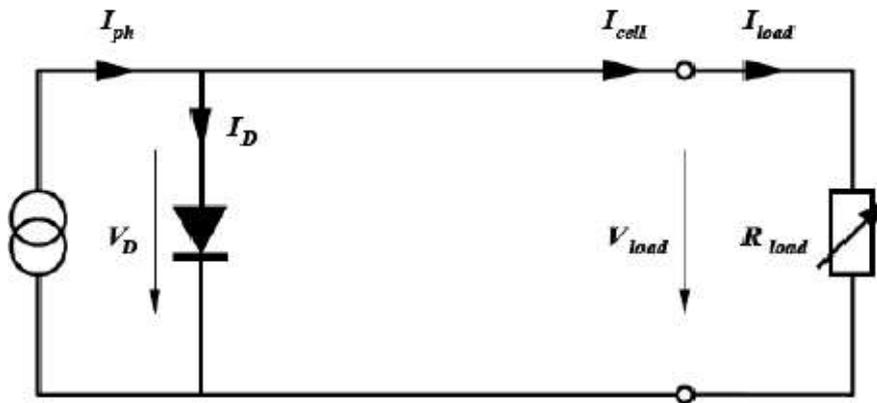
## ***Chapitre II :***

### **Description Théorique et Modélisation de la Cellule PV**

## II.1 DESCRIPTION THEORIQUE ET MODELISATION DE LA CELLULE PV

### II.1.1 Cellule Pv idéale – modèle simple.

Comme il a déjà été mentionné, dans une cellule solaire illuminée, il se crée des porteurs de charges libres. Le nombre de ces porteurs de charge est proportionnel à l'intensité du rayonnement incident. Il en est de même pour le photo courant à l'intérieur de la cellule. Par conséquent, une cellule PV idéale peut être représentée par le circuit électrique équivalent illustré sur la figure II .1. Ce circuit est constitué d'une diode qui représente la jonction P-N de la cellule, et d'une source de courant constant dont l'amplitude du courant dépend de l'intensité du rayonnement [4]. Une résistance ajustable est connectée à la cellule en guise de charge. L'utilisation du circuit électrique équivalent permet de modéliser les caractéristiques ou le comportement de la cellule PV [4][6].



**Figure II .1 : Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale connectée à une charge [4].**

avec :

$I_{ph}$  : photo-courant

$V_{cell}$  : tension aux bornes de la cellule

$I_D$  : courant à travers la diode

$I_{cell}$  : courant délivré par la cellule

$I_{load}$  : courant à travers la charge

$V_{load}$  : tension aux bornes de la charge

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{qV_{cell}}{nkT}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

avec :

$I_{cell}$  : courant fourni par la cellule [A]

$V_{cell}$  : tension aux bornes de la cellule [V]

$q$  : charge électrique élémentaire [ $1.6 \cdot 10^{-19}$  As]

$k$  : constante de Boltzmann [ $8.65 \cdot 10^{-5}$  eV/K =  $1.381 \cdot 10^{-23}$  J/K]

$T$  : température absolue de la cellule [K]

$I_s$  : courant de saturation de la jonction non éclairée [A]

$n$  : facteur d'idéalité de la jonction

Le courant de saturation  $I_s$  caractérise le phénomène de diffusion des porteurs minoritaires dans la zone de déplétion. Lorsque les bornes du circuit sont court circuité ( $R_{load} = 0$ ), la tension de sortie est nulle et, d'après l'équation 2.1, le courant fourni par la cellule est à son maximum. Ce courant est appelé courant de court-circuit  $I_{sc}$  (short-circuit).

$$I_{sc} = I_{ph} \quad (2.2)$$

Pour une charge infiniment grande (circuit ouvert), le courant de sortie est nul et la tension aux bornes de la cellule est maximale. Cette tension est appelée tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  (opencircuit). A partir de l'équation (2.1), on peut écrire :

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) = V_{th} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (2.3)$$

$$V_{th} = \frac{nkT}{q}, \text{ est appelée tension thermique.}$$

$V_{oc}$  est déterminé par les propriétés du semi-conducteur, car il dépend de  $I_s$  qui lui-même dépend de la densité de courant de saturation du matériau utilisé.

En pratique, la caractéristique courant/tension ( $I = f(V)$ ) de la cellule peut être construite, point par point, en utilisant une résistance ajustable (figure II.2) [1].

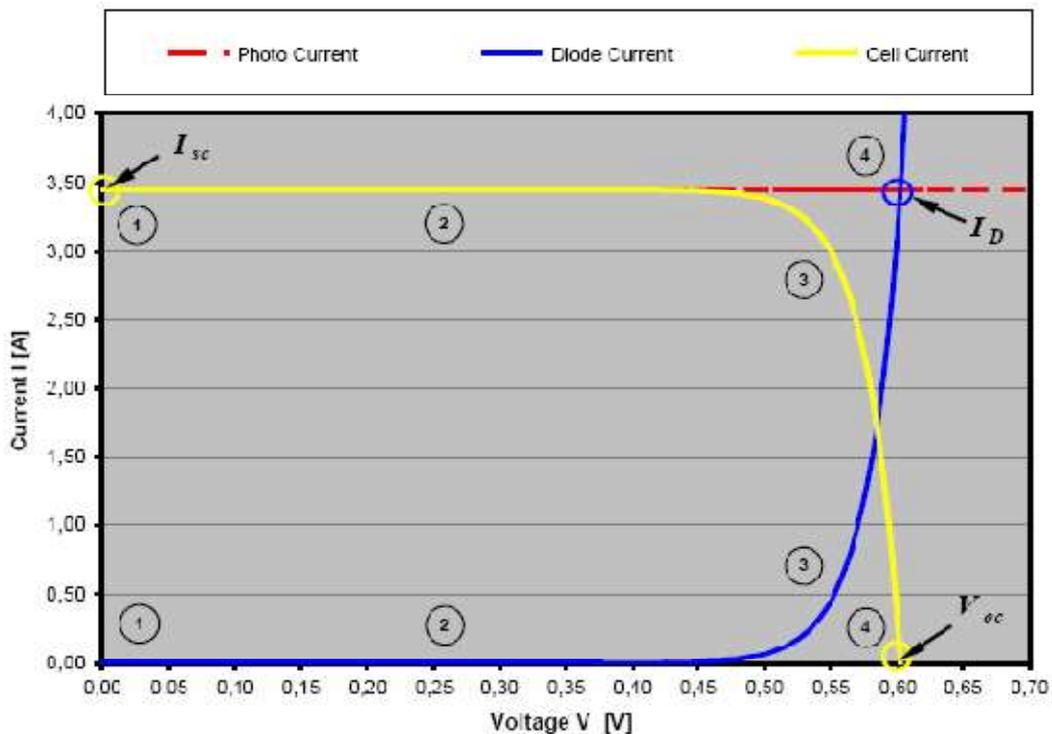
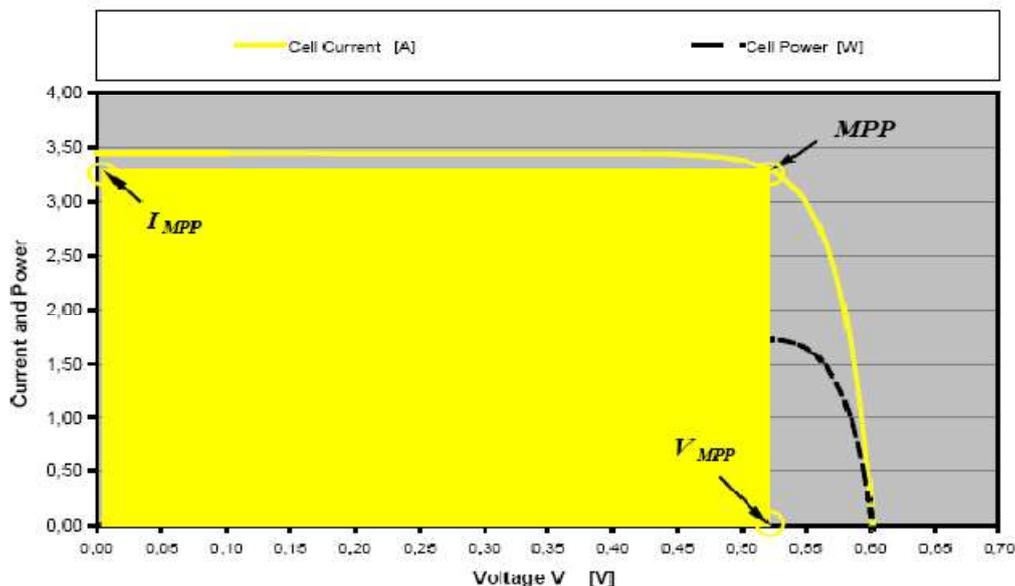


Figure II.2 Caractéristique I/V d'une cellule PV [4]

Il existe un point particulier sur la courbe caractéristique (I/V), pour lequel la puissance  $P = IV$  fournie par la cellule est maximale (graphiquement indiquée par la surface d'un rectangle). Ce point est appelé, Point de Puissance Maximum (en anglais Maximum Power Point, MPP). Ce point est situé sur le coude de la courbe caractéristique (I/V) (figure 2.3). Les valeurs des coordonnées de ce point,  $V_{MPP}$  et  $I_{MPP}$ , peuvent être estimées à l'aide de  $V_{oc}$  et  $I_{sc}$  de la manière suivante [1][2].

$$0.75 \cdot V_{oc} \leq V_{MPP} \leq 0.9 \cdot V_{oc}$$

$$0.85 \cdot I_{sc} \leq I_{MPP} \leq 0.95 \cdot I_{sc}$$



**Figure II.3: Courbe de puissance et MPP d'une cellule PV [4].**

Mathématiquement, on obtient ce point de la façon suivante :

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{\partial(IV)}{\partial V} = I + V \frac{\partial I}{\partial V} = 0 \quad (2.5)$$

FF appelé Facteur de Forme, est donné par [1] :

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.6)$$

Il représente la mesure de la qualité de la cellule solaire. Sa valeur pour une cellule solaire cristalline est entre 0.7 et 0.8. Il diminue avec l'augmentation de la température de la cellule.

La puissance de sortie maximal de la cellule est donnée par :

$$P_{MPP} = V_{MPP} \cdot I_{MPP} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \quad (2.7)$$

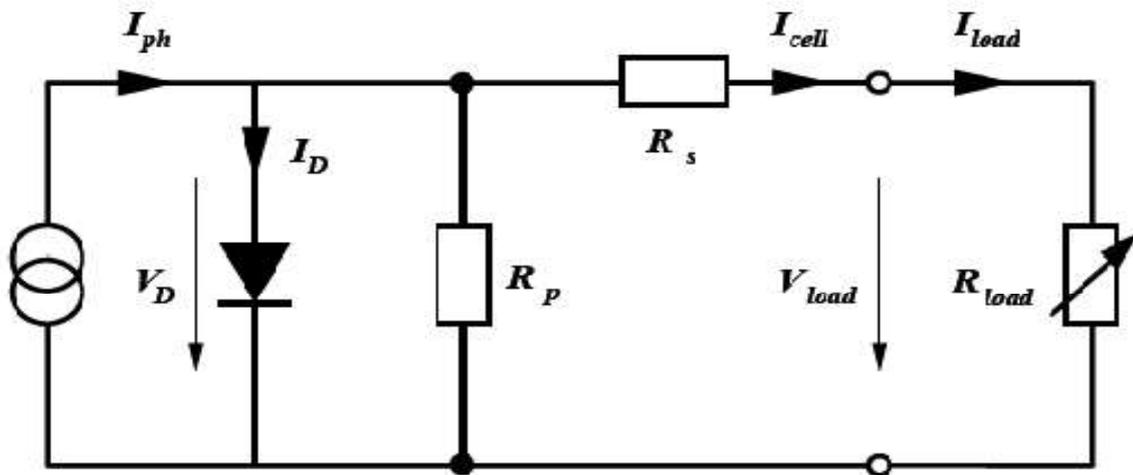
$P_{MPP}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  sont des paramètres spécifiés par le fabricant. Ces valeurs sont données pour un ensoleillement, une température de fonctionnement et un air masse donné (AM1.5). Le rendement de la cellule PV est donné par :

$$\eta = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (2.8)$$

Avec  $P_{in}$  : puissance fournie par le soleil.

### II.1.2 Cellule PV réelle –modèle précis.

En ce qui concerne le comportement d'une cellule solaire réelle, deux résistances parasites sont prises en considération pour une description plus exacte.



**Figure II.4 : Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle connectée à une charge [4].**

avec :

$R_p$  résistance parallèle caractérisant le courant de fuite à la surface de la cellule dû à la non idéalité de la jonction P-N et des impuretés près de la jonction.

$R_s$  résistancesérie représentant les diverses résistances de contact et la résistance du semi-conducteur.

En pratique, la résistance parallèle  $R_p$  est très importante (de l'ordre du méga Ohm) et la résistance série  $R_s$  est très faible (de l'ordre de quelques milli-ohms).

Avec un tel circuit électrique équivalent, on peut écrire :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D - \frac{V_D}{R_p} \quad (2.9)$$

$$I_D = I_s \left( e^{\frac{V_D}{V_{th}}} - 1 \right) \quad (2.10)$$

$$V_D = V_{cell} + R_s I_{cell} \quad (2.11)$$

d'où :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left( e^{(V_{cell} + R_s I_{cell})/V_{th}} - 1 \right) - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \quad (2.12)$$

L'effet des résistances  $R_s$  et  $R_p$  apparaît sur la caractéristique ( $I/V$ ), comme le montrent les figures suivantes [4] :

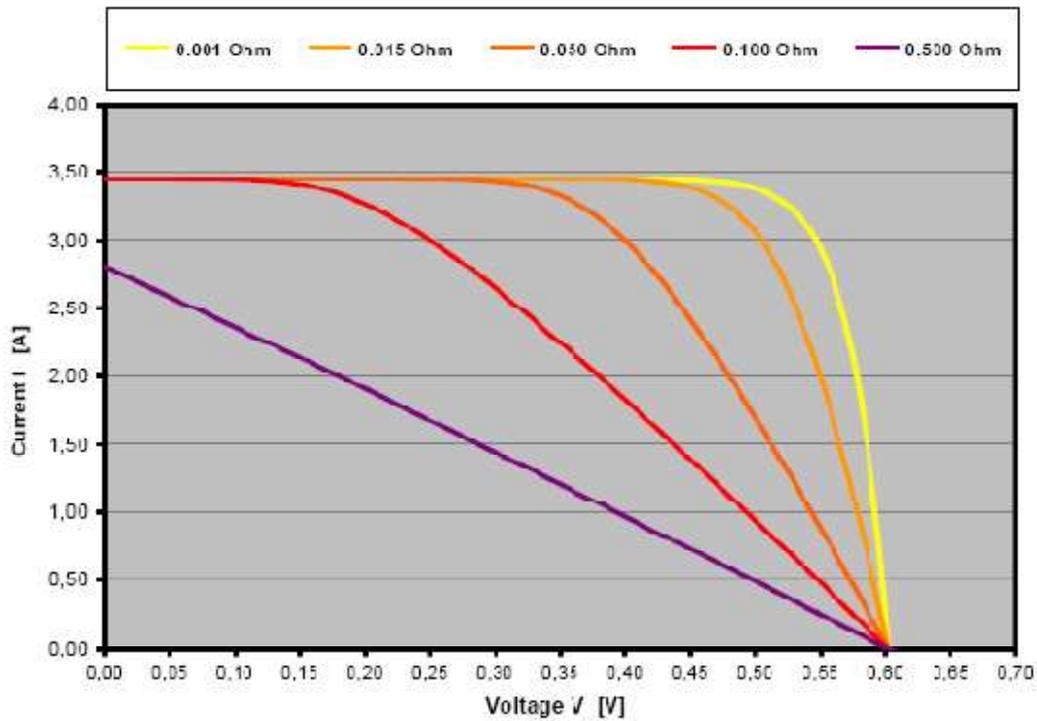


Figure II.5 : Caractéristique  $I/V$  pour différentes valeurs de  $R_s$  [4]

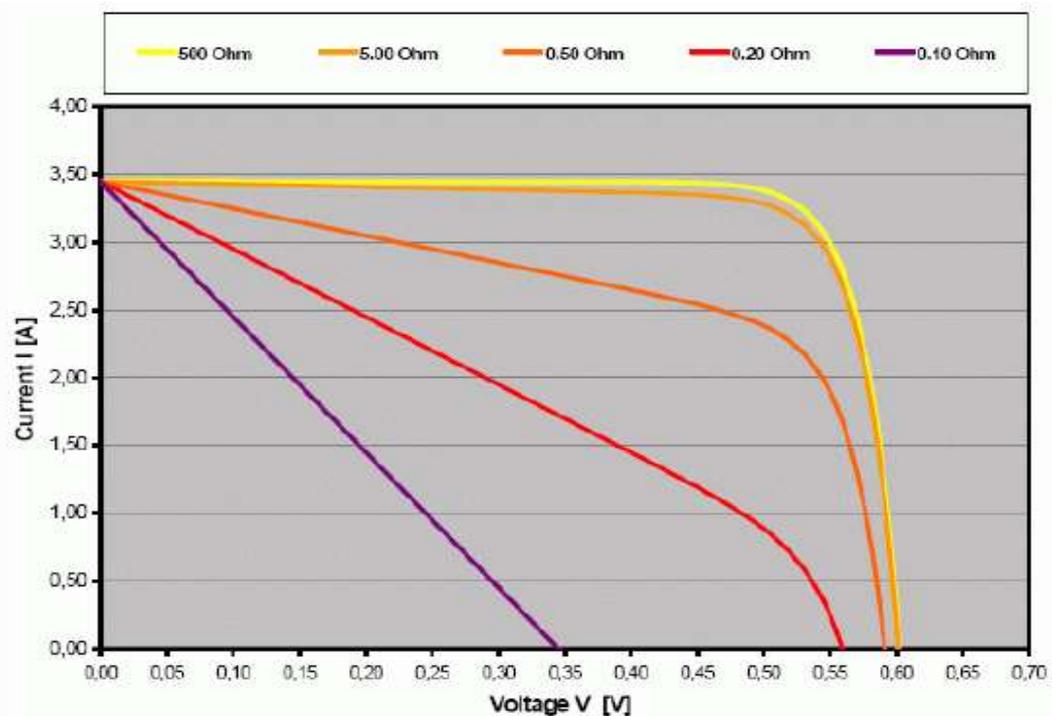
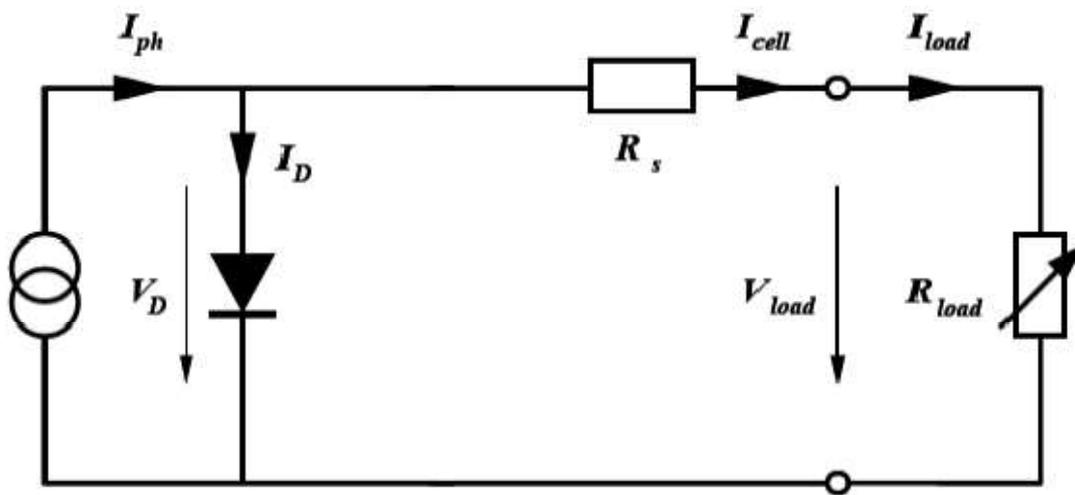


Figure II.6 : Caractéristique  $I/V$  pour différentes valeurs de  $R_p$  [4]

De grandes valeurs de  $R_s$  réduisent le courant de court circuit  $I_{sc}$ , tandis que de petites valeurs de  $R_p$  réduisent la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ . La variation de cette résistance affecte donc le facteur de forme FF et aussi la puissance de sortie. En négligeant l'effet de  $R_s$  et  $R_p$ , on obtient l'équation 2.1. Il existe un autre modèle avec deux diodes en parallèle. La deuxième diode représente alors le phénomène de recombinaison des porteurs de charge au niveau de la zone de déplétion. Dans ce cas, les facteurs d'idéalité des diodes sont égaux à 1 et 2 respectivement. Pour le modèle avec une seule diode, le facteur d'idéalité est considéré comme un paramètre variable qui prend ses valeurs entre 1 et 2. Généralement, l'effet de la résistance parallèle du circuit électrique équivalent est négligé, car son influence n'est prépondérante que pour des niveaux d'éclairement très bas. Il en découle un circuit électrique équivalent simplifié comme le montre la figure ci-dessous [4].



**Figure II.7 : Schéma du circuit électrique équivalent simplifié d'une cellule PV réelle [4].**

Le courant délivré par la cellule est alors donné par l'expression :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left( e^{(V_{cell} + R_s I_{cell}) / V_{th}} - 1 \right) \quad (2.13)$$

et la tension à ses bornes est donnée par :

$$V_{cell} = -R_s I_{cell} + V_{th} \ln \left( \frac{I_{ph} - I_{cell} + I_s}{I_s} \right) \quad (2.14)$$

Pour une modélisation plus précise de la cellule PV, l'influence du niveau d'éclairement ainsi que celle de la température doivent être prises en compte.

En pratique, les paramètres de la cellule sont donnés (par le fabricant) dans des conditions de test standard (STC : Standard Test Conditions) ou nominales comme l'indique le tableau suivant [4] [6]:

Conditions Nominales	Conditions de Test Standard
Eclairement $G_{nom} = 800W/m^2$	Eclairement $G_0 = 1000W/m^2$
Température ambiante $T_{a,nom} = 20^\circ C$	Température de la cellule $T_0 = 25^\circ C$
Vitesse du vent : $1m/s$	

Sous les conditions de test standard, les paramètres mesurés sont : - le courant de court-circuit  $I_{sc,0}$  - la tension de circuit ouvert  $V_{oc,0}$  - la puissance maximale  $P_{max,0}$ . Sous les conditions nominales, la température de la cellule TNOCT (NOCT : Nominal Operating cell Température) est mentionnée sur le catalogue du fabricant. Le photo courant  $I_{ph}$  est directement proportionnel à l'éclairement. Si  $I_{sc,0}$  est donnée sur le catalogue en STC, alors le photo courant généré pour n'importe quel autre valeur de  $G$ , est donné par :

$$I_{ph}|_{T_0} = \frac{I_{sc,0}}{G_0} \cdot G = C_1 G \quad (2.15)$$

La photo courant dépend aussi de la température, son expression est donnée par [4]:

$$I_{ph} = I_{ph}|_{T_0} \cdot (1 + k_0 (T - T_0)) \quad (2.16)$$

$$k_0 = \frac{I_{sc}|_{T_2} - I_{sc,0}}{T_2 - T_0} \quad (2.17)$$

Avec  $k_0$  :

Coefficient de température de  $I_{ph}$  (habituellement donné par le fabricant sur le datasheet en pourcentage de changement par degré Celsius).  $T_2 = 75$

La température de fonctionnement de la cellule TC dépend de l'éclairement  $G$  et de la température ambiante  $T_a$ , selon l'équation empirique suivante [1][4]:

$$T^C = T_a + C_2 G \quad (2.18)$$

Avec :

$$C_2 = \frac{T_{NOCT} T_{a,nom}}{G_{nom}} \quad (2.19)$$

## II.1.3 Effets des variations climatiques sur la cellule photovoltaïques

### II.1.3.1 Variations de l'énergie incidente

La variation d'énergie incidente (ensoleillement) entraîne une variation du courant proportionnel à cette dernière et une variation de la tension relativement faible (figure II .8). ce phénomène physique est intéressant lors de la recharge de batteries [1].

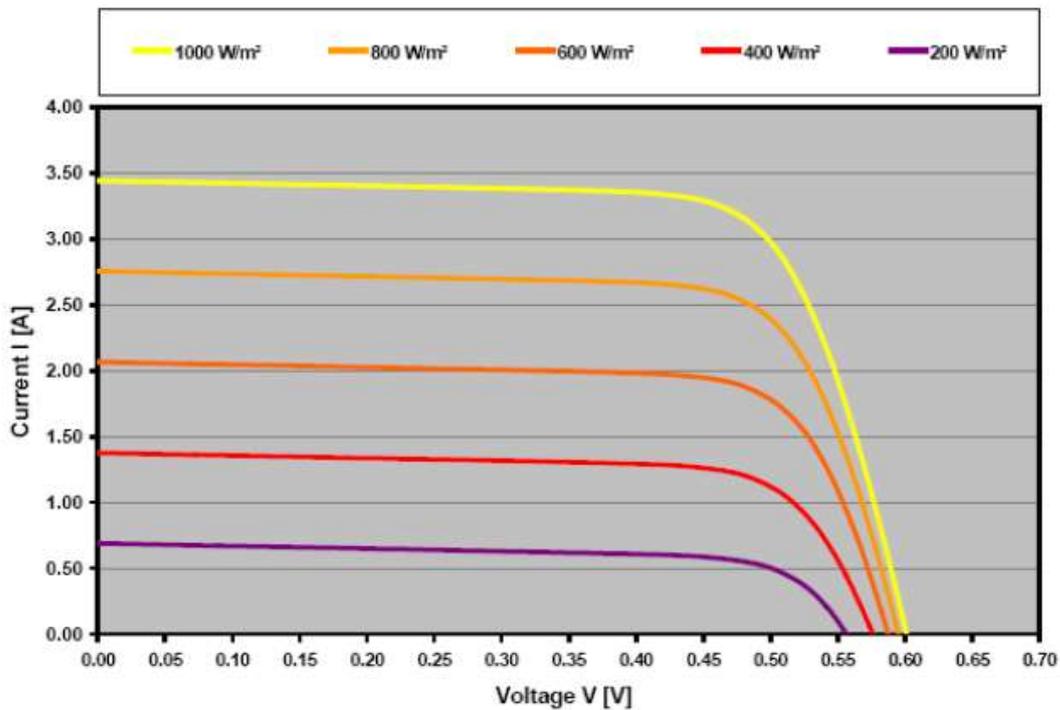
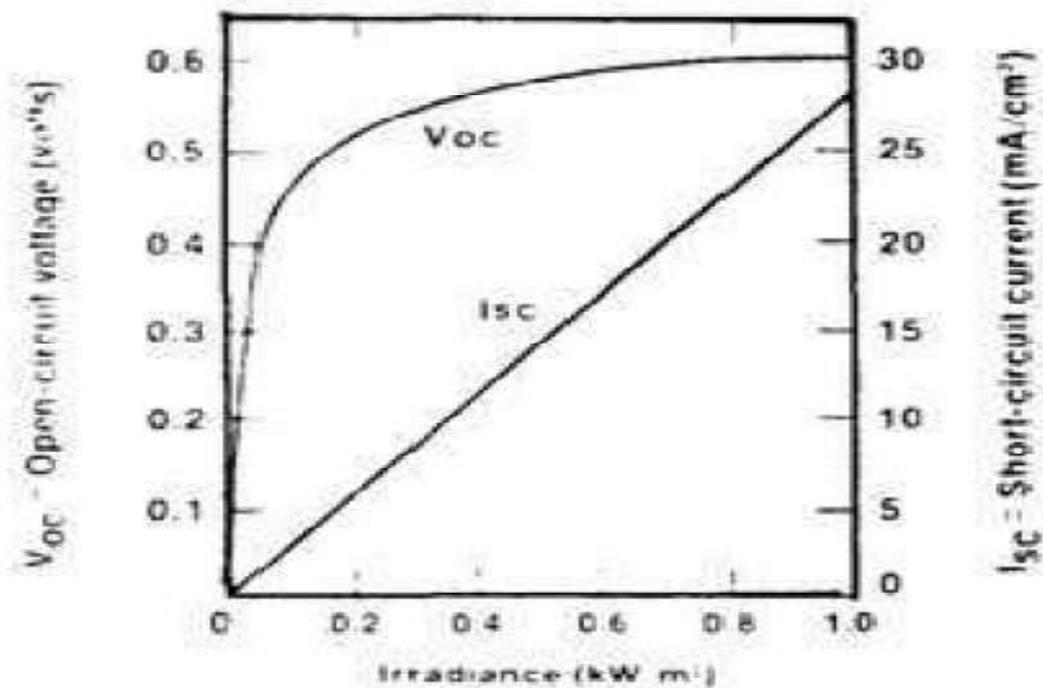


Figure II.8 : Caractéristique I/V pour différents niveaux de rayonnement [4].



**Figure II.9 : Variations de courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de l'irradiance [4]**

Le courant de court-circuit est directement proportionnel au rayonnement incident. Par contre, la tension de circuit ouvert augmente rapidement pour de faibles niveaux d'éclairement, puis lentement pour des niveaux plus élevés (figure II.9).

### II.1.3.2. Variations de la température.

Puisque l'énergie du band gap décroît avec l'augmentation de la température, plus de photons ont assez d'énergie pour créer des paires électrons-trous. Par conséquent, le courant de court circuit augmente légèrement.  $I_{sc}$  augmente d'environ  $0.07\% / ^\circ K$

La tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  baisse avec la hausse de température. Cette baisse est aux alentours de  $0.4\% / ^\circ K$ . La puissance chute de  $0.5\%$

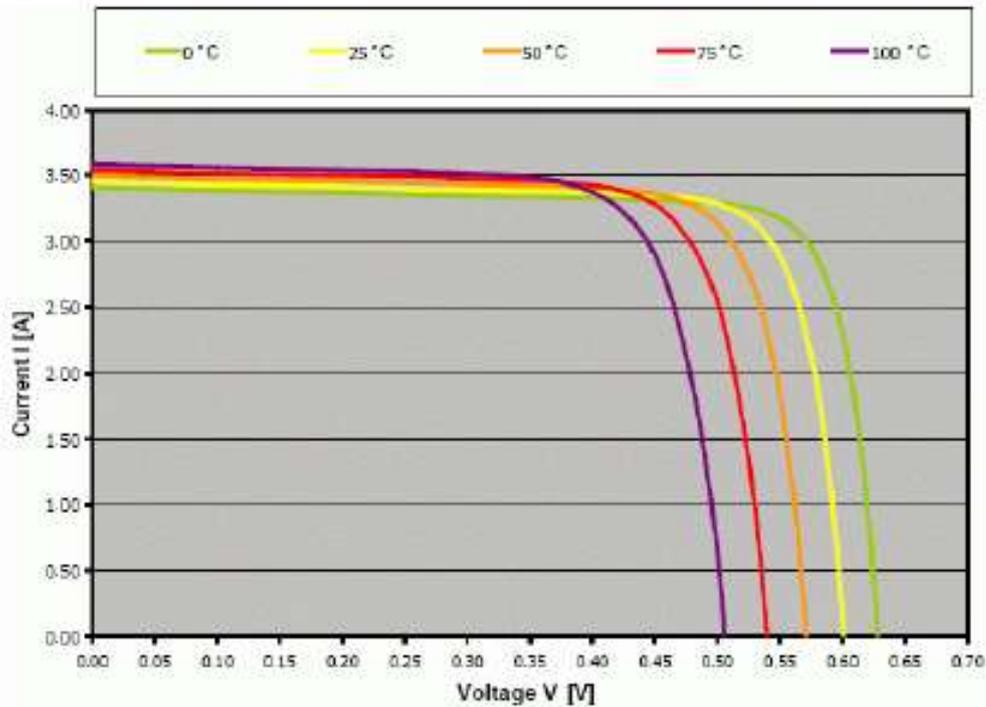


Figure II .10 : Caractéristique I/V pour différentes températures

## II.2. Simulation de la cellule photovoltaïque [4][2].

L'utilisation du circuit électrique équivalente permet de modéliser les caractéristiques de la cellule PV. et simuler le comportement de la cellule PV sous l'environnement MATLAB.

Le modèle que nous avons utilisé pour simuler le comportement de la cellule PV est basé sur le modèle électrique équivalent simplifié représenté sur la figure 2.8 et dont l'expression du courant délivré  $I_{cell}$  est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{(V+R_s I)/V_{th}} - 1 \right)$$

La fonction utilisée sous MATLAB effectue le calcul pour 5 itérations pour assurer la convergence de la solution. Les résultats de la simulation obtenus sont représentés sur les figures ci-dessous.

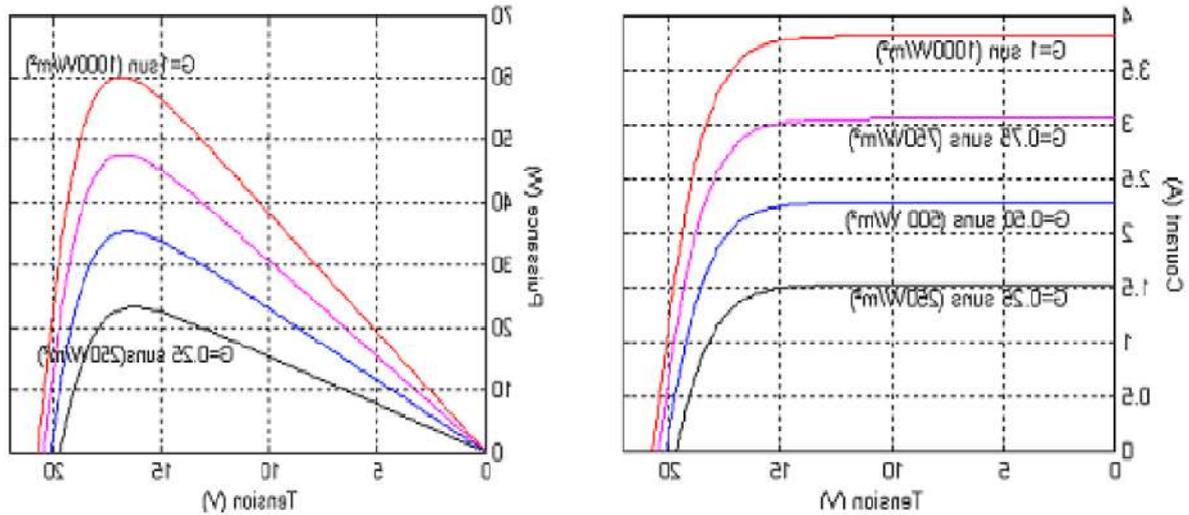


Figure II.11 : Influence de l'éclairement solaire [6].

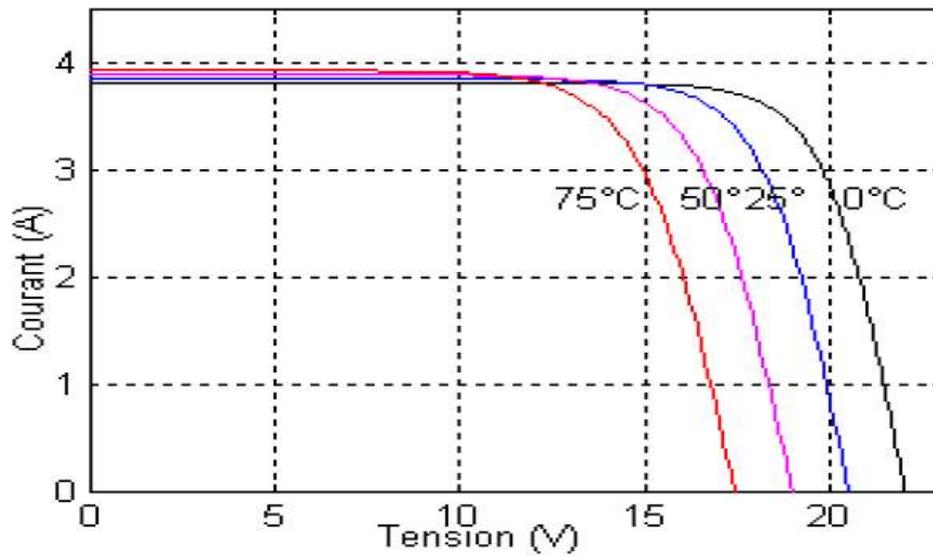


Figure II.12 Influence de la température [6].

### II.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium. Ensuite, nous avons défini son rendement et les différents types de cellules existants. Pour la modélisation mathématique de la cellule, nous nous sommes basés sur le modèle électrique équivalent. Nous avons aussi vu l'effet des changements climatiques sur l'énergie produite par la cellule à travers des graphiques représentatifs. Pour simuler le comportement de la cellule photovoltaïque, nous avons fait appel au logiciel MATLAB.

## ***Chapitre III :***

### **Simulation thermique d'un panneau PV hybride**

### III .1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des simulations obtenus à partir d'un code de calcul développé et implémenté sous environnement MATLAB. Le code développé est basé sur la méthode des volumes finis adopter comme méthode de résolution des équations différentielles caractérisant l'évolution spatio-temporelle de la température au sein d'un panneau solaire hybride. Les résultats présentés traduisent le comportement thermique d'un panneau solaire hybride. L'ensemble des couches de la cellule sont prisent en compte. Le transfert de chaleur d'une couche à une autre est supposé dû essentiellement à la convection et à la conduction. L'ensemble des propriétés thermiques des couches de la cellule ont été trouvées dans la littérature. Le but de cette présentation est de présenté un ensemble de résultats thermiques dans le but de couplé l'ensemble des résultats obtenus avec les grandeurs électrique du panneau qui dépendrons largement de l'effet thermique produit dans la cellule. Ce couplage doit être adopté dans les perspectives dans le but de présenter l'ensemble des grandeurs électrique en fonction de la température.

Avant de présenté l'ensemble des résultats, nous présentons en premier lieu, un rappel théorique sur les panneaux hybride où nous présentons leurs types ainsi que ces principaux avantages et inconvénients par rapports aux panneaux conventionnel, c'est-à-dire thermique ou photovoltaïque. Dans un second temps, nous présentons le modèle mathématique adopté qui inclut l'équation de diffusion de la chaleur ainsi que la méthode adopté pour résoudre le problème caractérisé par une équation différentielle.

### III.2. LE PANNEAU SOLAIRE HYBRIDE [5].

Le fonctionnement d'un panneau solaire hybride est relativement simple à comprendre. Il est constitué de capteurs thermiques à haut rendement sur lesquels reposent des cellules solaires photovoltaïques. Ces dernières transforment le rayonnement solaire en électricité, tandis que les capteurs thermiques récupèrent la chaleur émise par le soleil grâce à un fluide caloporteur injecté par un échangeur ou grâce à un collecteur d'air chaud Figure III.1.



**Figure III .1 Systèmes d'exploitation de l'énergie solaire [6].**

Le panneau solaire hybride permet ainsi de générer simultanément de l'électricité et de la chaleur grâce à ses deux faces au fonctionnement distinct :

- En couche supérieure (côté soleil) : ses cellules photovoltaïques produisent de l'électricité dès qu'elles sont exposées au rayonnement solaire.
- En couche inférieure (côté intérieur) : un capteur solaire thermique capte la chaleur émanant du soleil.

Associant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques et thermiques, ces panneaux solaires hybrides, aussi appelés « panneaux PV/T », reposent ainsi sur le principe de la cogénération solaire permettant de :

- Générer de l'électricité pour éclairer votre logement et alimenter tous vos appareils installés dans votre maison à partir d'énergie naturelle.
- Produire de la chaleur pour chauffer votre eau, une piscine, l'air ambiant ou même pour faire fonctionner votre plancher chauffant.

Certains panneaux solaires hybrides présentent un système de transfert de chaleur optimisé entre la face avant photovoltaïque et la circulation d'eau antigel, grâce à un échangeur thermique intégré. Contrairement à un capteur solaire thermique, l'hybride ne contient pas systématiquement un isolant en sous-face afin d'éviter toute perte de chaleur. Permettant de générer une hausse du rendement à hauteur de 40% pour une même surface de panneaux solaires, ce système hybride à la fois innovant et écologique est une solution à considérer dans le cadre de vos travaux d'économies d'énergie. Réunissant en une unique technologie les possibilités du solaire thermique et du photovoltaïque, cette cogénération permet d'optimiser la surface. En effet, cela permet d'éviter de multiplier les systèmes utilisés et donc de réduire la surface d'exposition nécessaire.

### III.2.1. Types de systèmes solaires hybrides [5].

On retrouve différents types de systèmes solaires hybrides basés sur un fonctionnement distinct.

#### III.2.1.1. L'aérovoltaïque (PVM-T AIR) .

Permet de maximiser l'utilisation de l'énergie solaire captée. Contrairement à des panneaux solaires photovoltaïques classiques, ce système est donc capable de s'approvisionner de la chaleur produite sous les panneaux. On retrouve également une solution hybride fonctionnant à l'eau et pour un refroidissement des panneaux plus efficace.

**La technologie aérovoltaïque combine :**

- **Panneaux solaires photovoltaïques** (face exposée au soleil) : elle produit de l'électricité comme les panneaux photovoltaïques classiques.
- **Panneaux solaires thermiques (face arrière)** : la face arrière comporte un dispositif de ventilation pour récupérer puis diffuser de l'air chaud dans une habitation (ou à l'intérieur d'une prise d'air d'un ballon thermodynamique). Cette ventilation confère une hausse du rendement des panneaux par rapport à une installation classique.

#### III.2.1.2. Les capteurs solaires hybrides à eau

Fonctionnent comme l'aérovoltaïque sauf qu'ils utilisent la circulation de l'eau plutôt que celle de l'air. Ce type de panneaux hybrides à eau permet de produire de l'électricité et de l'eau chaude. Il se caractérise par :

- Un système de refroidissement efficace : les capteurs photovoltaïques sont équipés d'un échangeur de chaleur à eau. L'eau permet à la fois de refroidir le panneau pour maximiser sa production d'électricité et de produire de l'eau chaude
- Un rendement en hausse : le refroidissement du panneau lui assure un meilleur rendement par rapport à une solution classique

### III.3. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU MIXTE PHOTOVOLTAÏQUE / THERMIQUE [5]

Un panneau solaire hybride offre de très nombreux avantages pour quelques inconvénients. D'abord, le rendement énergétique de ce type de panneau solaire est bien

supérieur aux panneaux solaires photovoltaïques. Aussi, vous économisez de l'espace en combinant deux technologies complémentaires sur une même surface.

### III.3.1. Les Avantages

Le panneau solaire PV/T a plusieurs avantages parmi les quels on peut citer :

- Un rendement énergétique intéressant : le rendement énergétique est de 70 à 90% contre 12 à 20% pour les panneaux solaires photovoltaïques [5].
- Une production d'énergie supérieure : un panneau solaire hybride permet de générer jusqu'à deux fois plus d'énergie pour une maison individuelle et jusqu'à quatre fois plus pour un bâtiment collectif [5].
- L'optimisation de l'espace : économisez l'espace en combinant la production électrique et thermique sur une même surface.
- Une technologie non polluante : l'électricité photovoltaïque n'est de pollution. Il s'agit donc d'une solution entièrement écologique s'inscrivant dans les démarches de préservation de notre planète.
- Une source d'énergie illimitée : l'énergie solaire est inépuisable, gratuite et naturelle.

### III.3.2. Les inconvénients

Comme toute solution, celle-ci compte également certains inconvénients. Le principal est sa sensibilité en fonction des températures  $T$  qui font varier son rendement.

- Une sensibilité en fonction des températures : plus la température augmente, plus son rendement baisse
- Un rendement limité : la stabilisation de la température du système n'offre pas une production solaire thermique optimale
- Une dépendance au rayonnement solaire : aucune énergie solaire n'est produite en l'absence de rayonnement (nuit).

### III.4. MODELE MATHEMATIQUE [7] :

Pour décrire l'évolution spatio-temporelle de la température, nous avons adopté l'équation différentielle suivante :

$$-\operatorname{div}\left(\vec{k} \operatorname{grad} T\right) = P - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{III.1})$$

Tels que :

$\rho$  : Masse volumique [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ],

$\vec{q}$  : Sources des flux de conduction [ $\text{W}/\text{m}^2$ ], donné par  $\vec{q} = -k \operatorname{grad} T$

$k$  : Conductivité thermique [ $\text{W}/(\text{m.K})$ ],

$T$  : Température [K],

$P$  : Terme source de chaleur. Dans ce travail, ce terme provient principalement par les conditions aux limites imposées.

Après développement des opérateurs différentiel de l'équation (III.1) en coordonnées cartésien, nous obtenons, l'équation algébrique suivante :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + P_s \quad (\text{III.2})$$

La mise en œuvre de la MVF consiste à intégrer les différents termes différentiels de l'équation III.2 sur le volume fini, correspondant au nœud P, et délimité par les frontières (e, w, n, s, t, b).

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \int_b^e \int_s^w \int_t^n \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz dt &= \int_t^{t+\Delta t} \int_b^e \int_s^w \int_t^n \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dz dt + \\ &\int_t^{t+\Delta t} \int_b^e \int_s^w \int_t^n \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dy dz dt + \\ &\int_t^{t+\Delta t} \int_b^e \int_s^w \int_t^n \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dx dy dz dt + \\ &\int_t^{t+\Delta t} \int_b^e \int_s^w \int_t^n P_s dx dy dz dt \end{aligned} \quad (\text{III.3})$$

Nous n'allons pas présenter les développements liés aux intégrales de l'ensemble des termes de l'équation III.3, mais nous allons présenter directement les résultats obtenus directement après intégration.

$$\rho c_p \Delta x \Delta y \Delta z (T_P - T_P^0) = a_e T_E \Delta t + a_w T_W \Delta t + a_n T_N \Delta t + a_s T_S \Delta t + a_t T_T \Delta t + a_b T_B \Delta t + (a_e + a_w + a_n + a_s + a_t + a_b) T_P \Delta t + P_S \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t \quad (\text{III.4})$$

ou :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_e = \frac{k_e \Delta y \Delta z}{\Delta x_e}, \quad a_w = \frac{k_w \Delta y \Delta z}{\Delta x_w}, \quad a_n = \frac{k_n \Delta x \Delta z}{\Delta y_n}, \quad a_s = \frac{k_s \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} \\ a_t = \frac{k_t \Delta x \Delta y}{\Delta z_t}, \quad a_b = \frac{k_b \Delta x \Delta y}{\Delta y_b} \end{array} \right.$$

Ainsi, l'équation algébrique finale peut être écrite sous la forme suivante

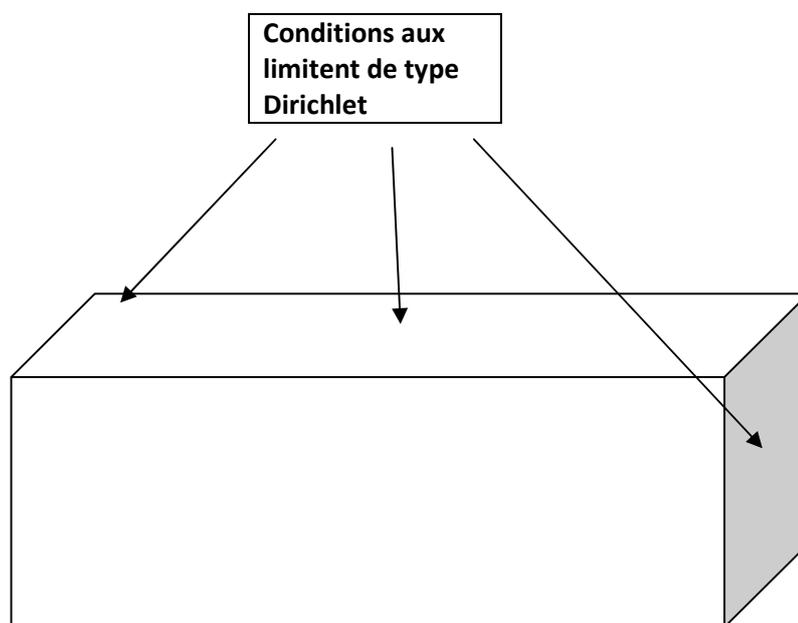
$$a_p T_P = a_e T_E + a_w T_W + a_n T_N + a_s T_S + a_t T_T + a_b T_B + b \quad (\text{III.5})$$

### III.5. RESULTATS DES SIMULATIONS REPRESENTANT LA TEMPERATURE DE CHAQUE COUCHE :

Dans la partie ci-dessous nous présentons les résultats des simulations qui traduisent le comportement thermique de chacune des couches représentant la cellule solaire. Les résultats à caractère thermique seront largement présentés. Les températures présentées sont calculés en allant du niveau supérieur (les niveaux extérieurs en contact avec l'environnement extérieur vers les niveaux inférieurs). La propagation de la température est supposé essentiellement due à la convection et à la conduction où les propriétés thermique jouent un rôle fondamentale dans la propagation de la température. Les conditions aux limitent jouent un rôle important dans la résolution du problème où le profil de la température dépendra principalement des conditions aux limites imposées. Dans ce travail, les conditions aux limitent imposées sont de type Dirichlet où la température environnante représente la température de l'air ou la température ambiante. Dans notre cas, nous avons imposé une température de 44°C (température de notre région).

La Fig.III.2 représente une description du problème à résoudre ainsi que les conditions aux limites imposées sur les frontières du panneau. Dans l'étude présentée, plusieurs hypothèses simplificatrices ont été imposées pour simplifier la résolution du problème tel que :

- L'effet des autres sources provoquant l'augmentation de la température ont été négligé.
- Le milieu est supposé homogène ou nous avons négligé le passage d'un milieu à un autre. Le problème résous alors la température sur les couches supérieures.



**Figure III.2 : Conditions aux limites imposées sur les frontières du problème à résoudre.**

Les figures ci-dessous représentent la répartition bidimensionnelle de la température sur différents niveaux de la cellule.

Dans la Fig. III.2 nous avons présenté la répartition spatiale de la température sur le niveau supérieur de la cellule. La température maximale atteinte sur ce niveau est presque de  $45.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . On peut dire alors que la température est augmenté de  $1.5^{\circ}\text{C}$  par rapport à celle imposée sur les frontières supposées maintenues à  $44^{\circ}\text{C}$ . Cette augmentation peut être expliqué par :

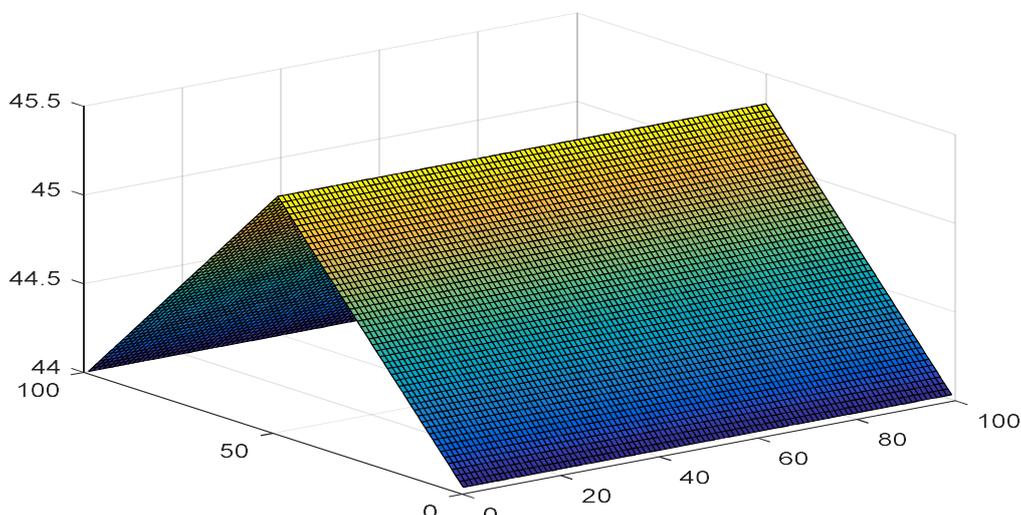
La température atteint un maximum dans les points les plus éloignées des frontières. En effet, les zones voisines des frontières doivent maintenir une température de 44 °C ceci par l'effet des conditions aux limites imposées sur les frontières. Pour les zones les plus éloignées, les propriétés thermiques des matériaux augmente la température progressivement par cumule de celle-ci.

Selon les résultats présentés on peut dire que le profil de la température est presque linéaire et adopte un profil symétrique par rapport à l'axe central du panneau. Aussi et selon les résultats présentés on peut dire que les cellules implantées dans le centre du panneau seront les plus influencé par l'effet thermique du panneau.

Les autres figures représentent les résultats obtenus caractérisant la température atteinte aux niveaux placés en dessous du niveau supérieur. Selon les résultats obtenus on peut dire que la température atteinte augmente considérablement en allant d'un niveau supérieur vers un niveau inférieur. Elle peut atteindre la température maximale, respectivement de, 46.5°C, 47.5° 48°C.

Selon les résultats présentés on peut dire que les températures atteintes au niveau du panneau augmente en s'éloignant progressivement des frontières du panneau en contact direct avec l'environnement extérieur, ou l'échange thermique provoquera une diminution de la température.

La température de chaque niveau supérieur agit pour augmenter la température du niveau inférieur. En effet, le niveau supérieur est influencé par une température de 44°C, mais pour les autres niveaux, le cumule de température agit pour augmenter la température.



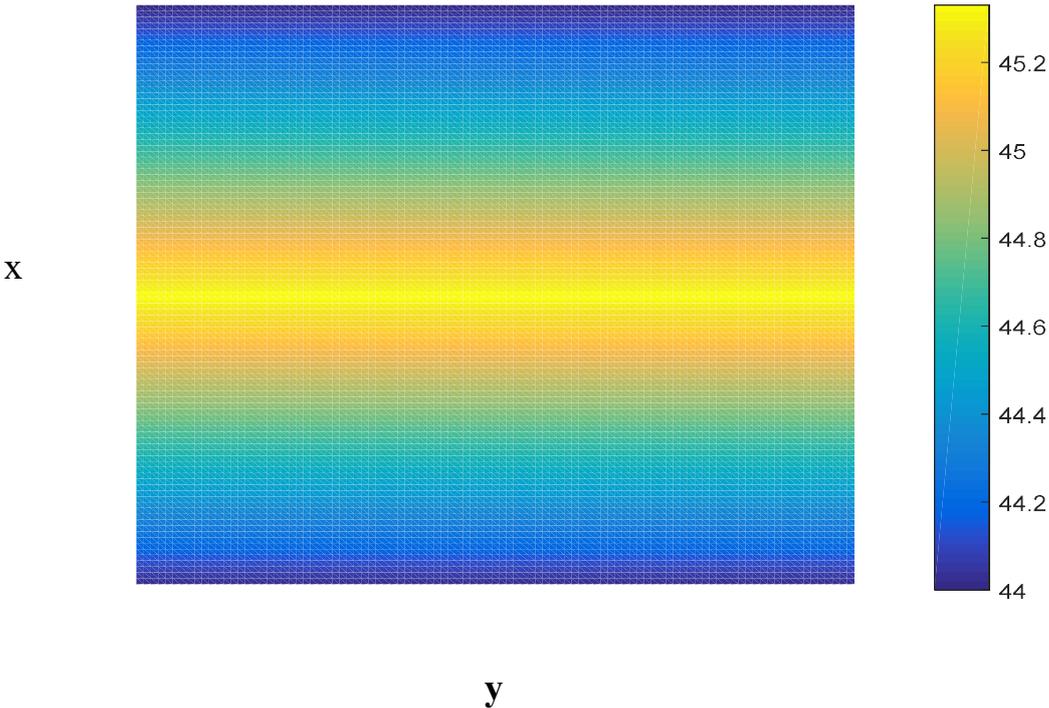
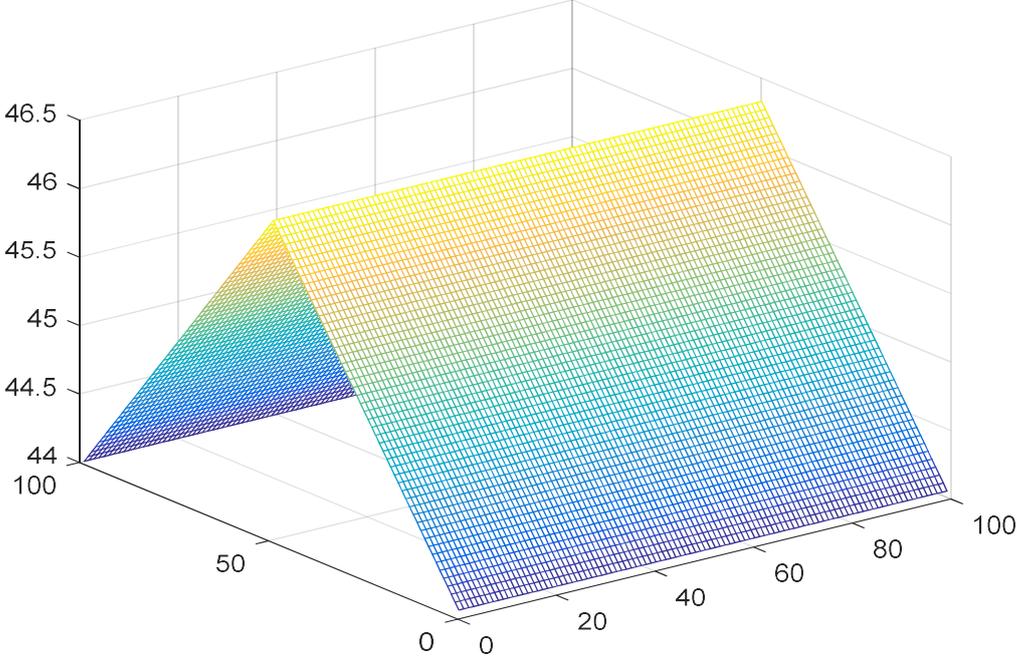
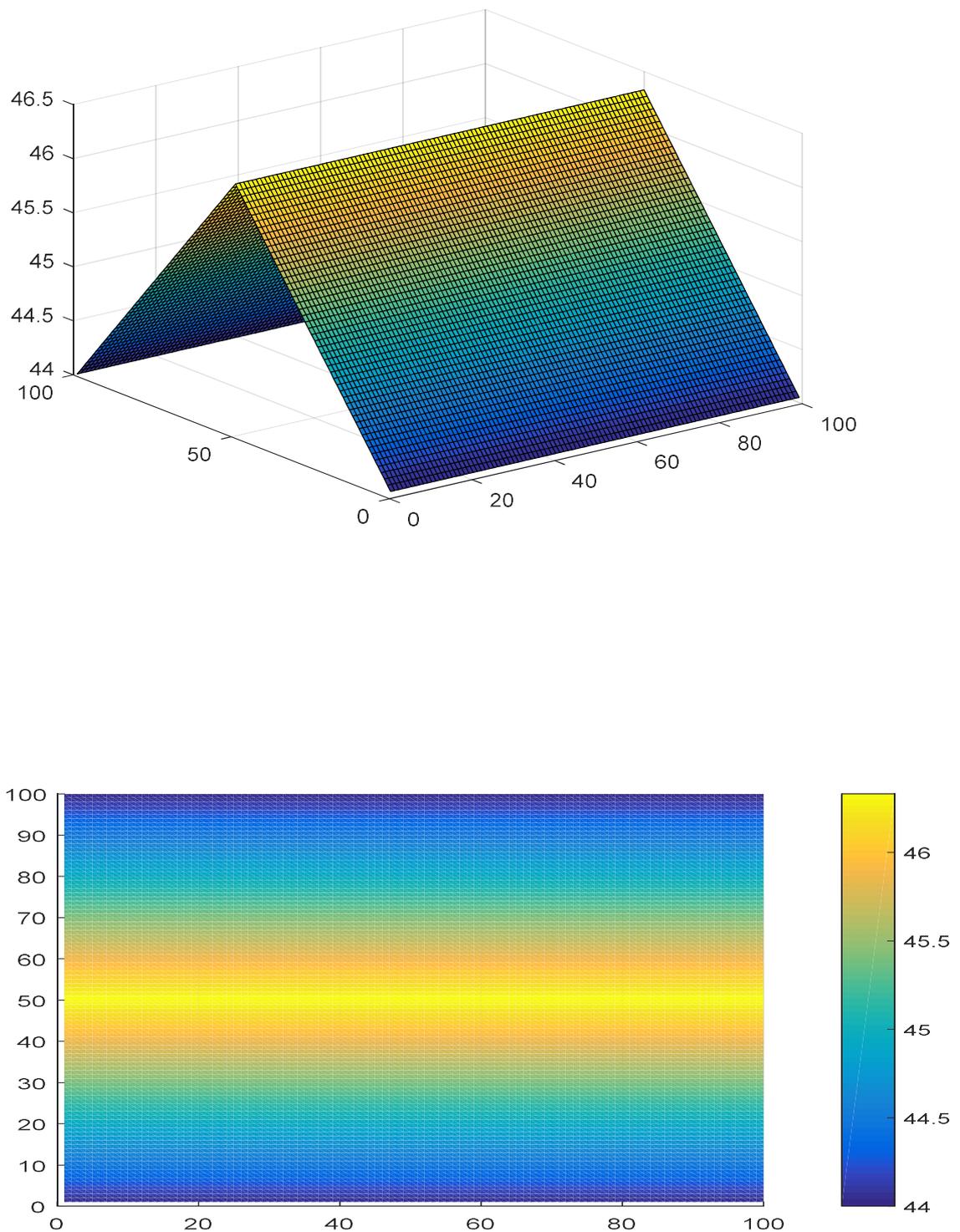
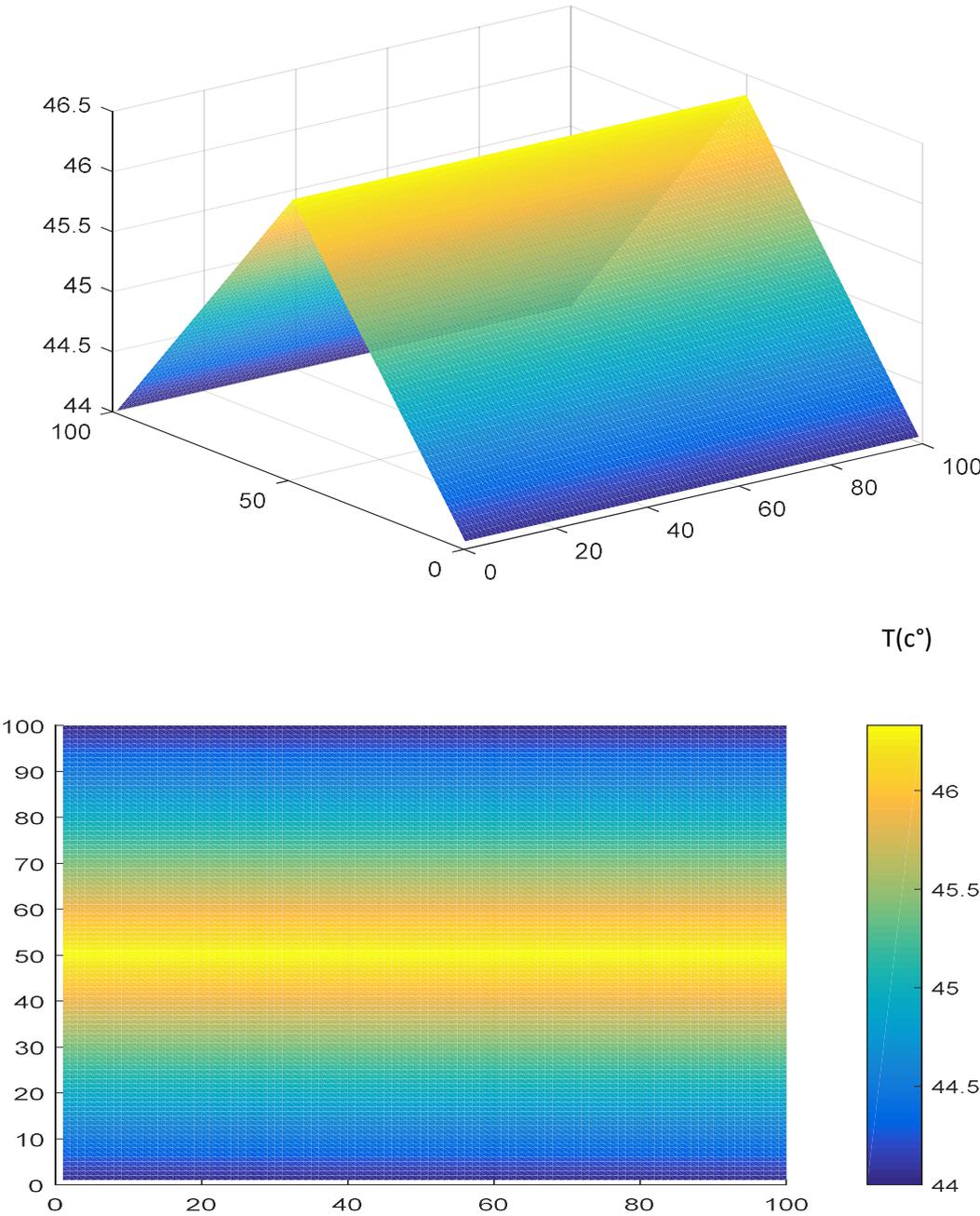


Figure III.3 : Profil bidimensionnel de la température sur le premier niveau du panneau

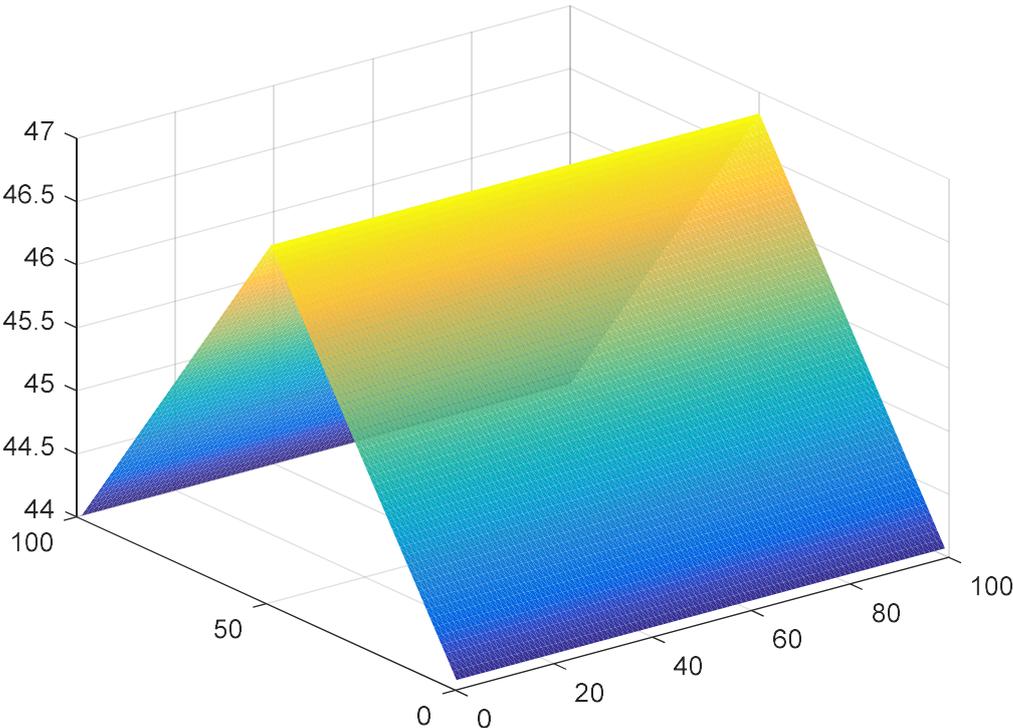
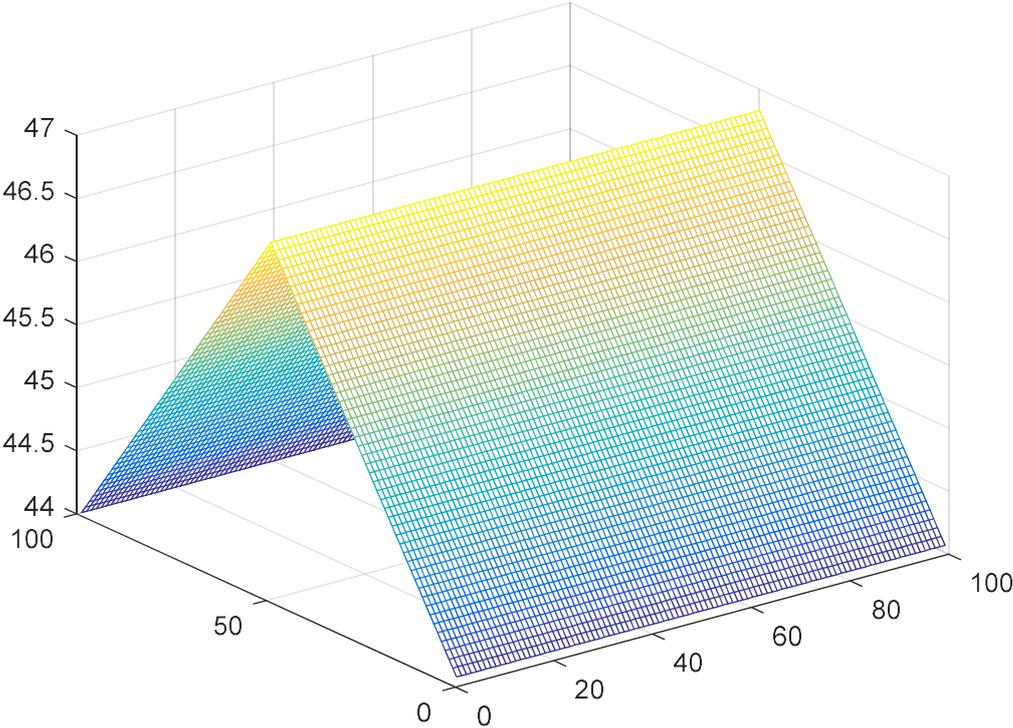


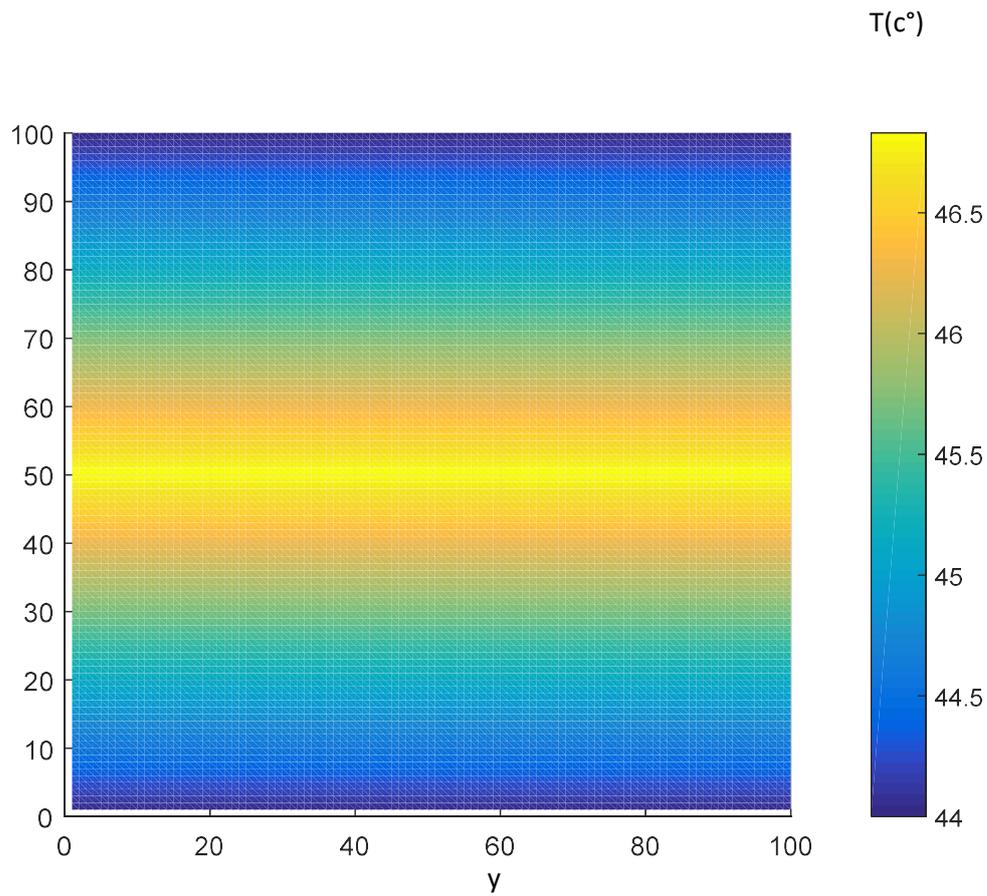


**Figure III.4. Profil bidimensionnel de la température sur le second plan placé en dessous du niveau supérieur du panneau**

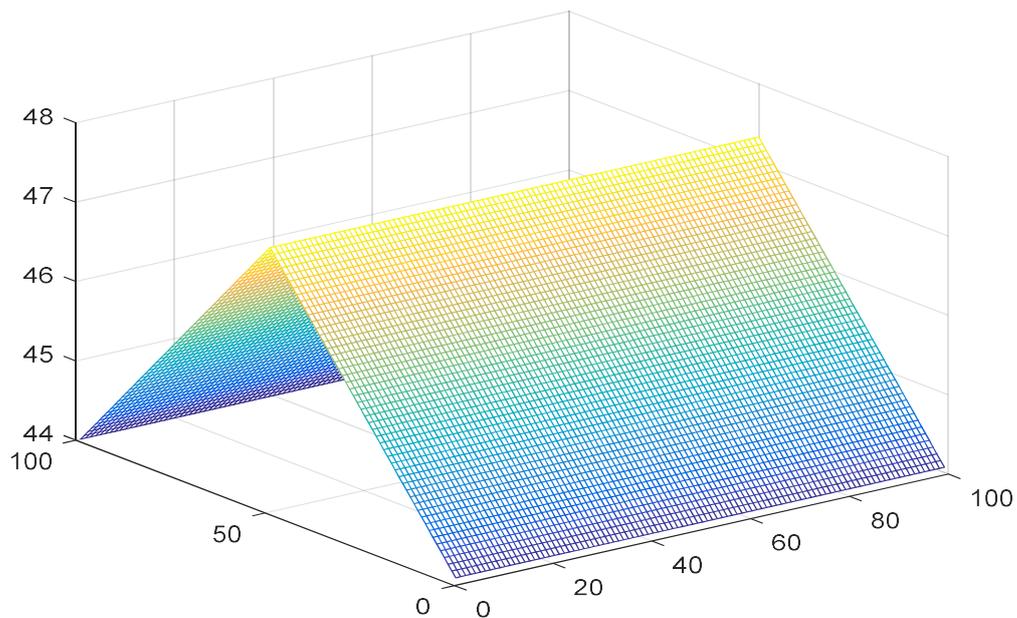


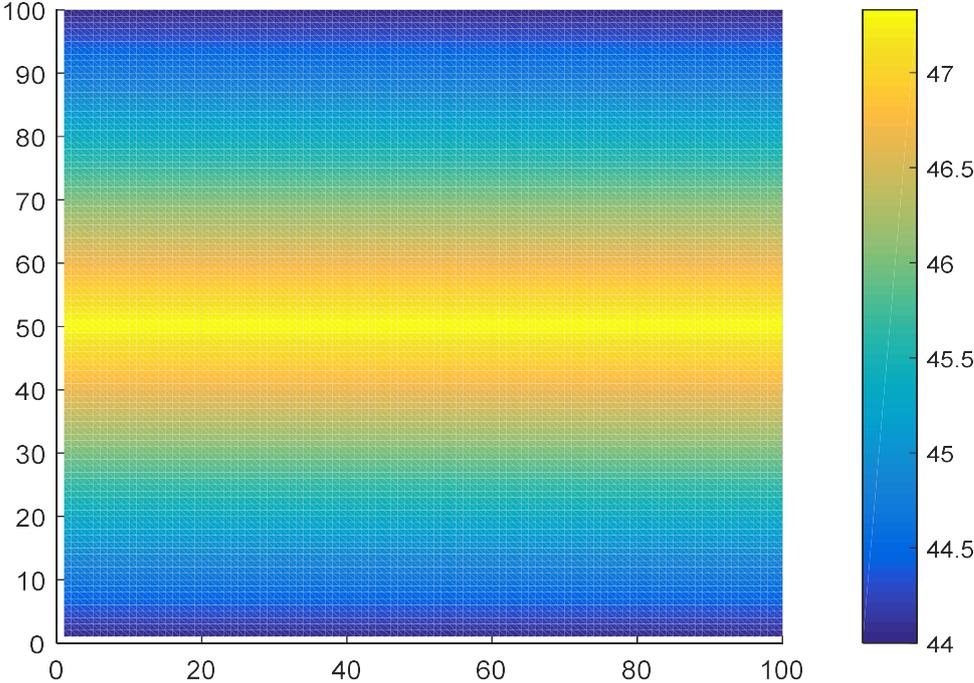
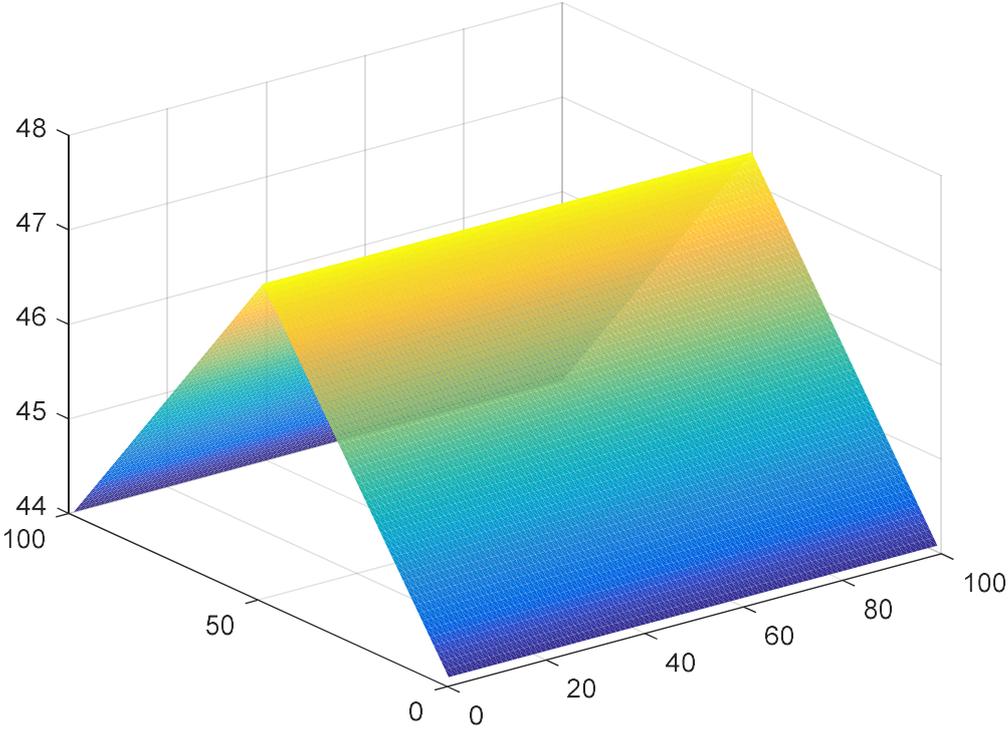
**Figure III.5. Profil bidimensionnel de la température sur le second plan placé en dessous du niveau supérieur du panneau**





**Figure III.6. Profil bidimensionnel de la température sur le second plan placé en dessous du niveau supérieur du panneau**





**Figure III.7. Profil bidimensionnel de la température sur le second plan placé en dessous du niveau supérieur du panneau**

### III.6 CONCLUSION

Les résultats présentés dans ce chapitre ont été obtenus à partir d'un code de calcul tridimensionnel développé et implémenté sous environnement MATLAB. La méthode des volumes finis a permis de résoudre le problème thermique où les résultats ont montré clairement le comportement thermique du panneau.

Les résultats obtenus ont montré que les différentes couches du panneau cumulent la température où celle-ci sera augmentée en allant d'un niveau supérieur vers un niveau inférieur.

Le niveau des cellules inférieures est le plus confronté à l'effet thermique. On peut dire alors que le profil de la température est fortement non-homogène.

Ce travail constitue un point de départ vers la modélisation des phénomènes thermiques produits dans un panneau solaire hybride où un code de calcul a été développé. Il est nécessaire d'améliorer celui-ci, par l'introduction des différentes couches qui peuvent intervenir dans le comportement électrique et thermique du panneau. Aussi il faut introduire l'influence de la circulation des fluides circulants dans le système.

Le comportement électrique peut être déduit à partir du modèle thermique développé. Cependant il est nécessaire de compléter le modèle thermique proposé dans le cadre de ce travail.

# **BIBLIOGRAPHIE**

### BIBLIOGRAPHIE:

[1] Mr Zaoui Fares (Utilisation des énergies renouvelables -influence de la température sur les performances du module P.V- Thèse Doctorat LMD) UNIV Med Kheidar BISKRA.

[2] Mr HELALI KAMELIA (Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque :

Etude Comparative -Mémoire de MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE UNIV MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU .

[3] MORNAY Thomas Sup D / VERNAY Alexis Sup D / VOLLE Marion Sup D Classes préparatoires CPE - Institution des Chartreux- Année 2004-2005

Professeur accompagnateur : M. Dietschy Groupe n°33

[4] Mr Boukli-Hacene Omar Thèse de MAGISTER en automatique informatique (Conception et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique) UNIV Abou Baker Belkaid -TELMCEN

[5] HYPERLINK <http://www.quelleenergie.fr/economies-energie/panneaux-solaires-photovoltaïques/fonctionnement>

[6] Mr KHELIFA Abdelkrim (Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PVT) Thèse Doctorat EN PHYSIQUE DE L'UNIVERSITE HADJ LAKHDAR DE BATNA-1- Option : Energies Renouvelables 22/01/2017

[7] Mr Lotfi ALLOUI (MODELISATION TRIDIMENSIONNELLE DES MATERIAUX SUPRACONDUCTEURS )Pour obtenir le grade de DOCTEUR de l'UNIVERSITE PARIS SUD