



Université d'Oran 2 Mohamed ben Ahmed

Institut de Maintenance et Sécurité Industrielle – IMSI

Département de sciences et technologies

**Mémoire**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière:** Génie industriel

**Spécialité:** Maintenance en instrumentation

**Thème**

**Technologies de cellules solaires  
photovoltaïques**

**Présente de soutenu publiquement par :**

**Ziane Walid et Chaachoua el Habib**

**Devant le jury composé de :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
<b>HAYMOUR RACHIDA</b>	<b>MCB</b>	<b>PRESIDENT</b>
<b>DJELGHOUM FARIDA</b>	<b>MAA</b>	<b>EXAMINATRICE</b>
<b>ARBI MAACHIA</b>	<b>MCB</b>	<b>ENCADREUR</b>

**2023/2024**

## Remerciement

On premier lieu nous tenons à remercier dieu le tout puissant de nous avoir donné la force, et la patience pour terminer nos études et pour élaborer ce modeste travail.

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à notre encadrant **ARBI MAACHIA** pour son aide, ses précieux conseils, son soutien et sa disponibilité tout au long de cette aventure. Merci à nos parents d'avoir su nous écouter et nous motiver tout au long de notre démarche. Que les membres de jury trouvent, ici, l'expression de nos sincères remerciements pour l'honneur qu'ils nous font en prenant le temps de lire et d'évaluer ce travail

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères au corps professoral et administratif de l'Institut de Maintenance et De Sécurité Industrielle d'Oran pour leurs efforts durant tous nos années d'études.

Nous voudrions également remercier et exprimer nos gratitudes envers nos ami(e)s et nos collègues de l'étude pour les moments de joie, de partage et d'entraide. Votre amitié a été une véritable bouffée d'air frais durant cette période intense.

Pour finir, on souhaite remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## Table des matières

Remerciement :.....	b
Table des matières :.....	c
Liste des Figures :.....	g
Liste des Tableaux :.....	i
Introduction général.....	2
<b>Chapitre I: Technologies des cellules solaires photovoltaïques...</b>	<b>5</b>
1 Introduction.....	5
2 Types de technologies de cellules solaires.....	5
3 explication des principes de fonctionnement .....	6
4 avantages et inconvénients de chaque type.....	8
5 généralités sur les technologies des cellules solaires.....	9
<b>Chapitre II : Applications actuelles et futures des cellules solaires.....</b>	<b>44</b>
1 :Introduction.....	44
2 : Utilisations domestiques des cellules solaires.....	44

<b>3 Applications industrielles des cellules solaires.....</b>	<b>48</b>
<b>4: Technologies futures pour le développement des cellules solaires.....</b>	<b>51</b>
<b>Chapitre III : Défis et innovations dans le domaine de l'énergie solaire.....</b>	<b>57</b>
<b>1 :introduction.....</b>	<b>57</b>
<b>2 : Défis de l'industrie solaire.....</b>	<b>57</b>
<b>3 : Innovations récentes dans l'énergie solaire.....</b>	<b>61</b>
<b>4 :Avenir de l'énergie solaire.....</b>	<b>64</b>
<b>Conclusion General.....</b>	<b>69.</b>
<b>8 :Bibliographie .....</b>	<b>71</b>

## Liste des Figures :

<b>Figure 1:</b> Schéma de principe d'une cellule à base de silicium amorphe .....	8
<b>Figure 2:</b> Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5. ....	11
<b>Figure 3 :</b> Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur.....	13
<b>Figure 4 :</b> Coefficient d'absorption du silicium.....	14
<b>Figure 5:</b> L'effet photovoltaïque.....	16
<b>Figure 6 :</b> Principales pertes intrinsèques pour une cellule photovoltaïque .....	18
<b>Figure 7 :</b> Rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque .....	19
<b>Figure 8:</b> Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	20
<b>Figure 9 :</b> Jonction P-N en polarisation directe.....	22
<b>Figure 10 :</b> Jonction P-N en polarisation directe.....	22
<b>Figure11:</b> La caractéristique d'une cellule photovoltaïque .....	23
<b>Figure 12 :</b> les différentes zones de caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque.....	24
<b>Figure 13:</b> La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température....	27
<b>Figure 14 :</b> La caractéristique de $P= f(V)$ en fonction de température.....	27
<b>Figure 15 :</b> Caractéristique courant tension de ( $N_p$ ) cellule en parallèle.....	28.

**Figure 16 :** Types de cellules photovoltaïques. (A) silicium monocristallin,(B) silicium poly cristallin, (C) silicium amorphe .....29

**Figure 17:** Maille élémentaire d'un cristal de silicium.....30

**Figure 18 :** Principe de la cellule à hétéro jonction .....31

**Figure 19 :** Schéma de principe d'un concentrateur photovoltaïque...33

**Figure 20 :**Schéma de principe d'une cellule à base de silicium amorphe.....37

**Liste des Tableaux :**

**Tableau I.1 :** Ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique :.....12



# *Introduction Générale*



## *Introduction Générale*

Dans le contexte global d'améliorations des performances d'un système photovoltaïque (PV), il nous a semblé intéressant de commencer ce mémoire par un bilan, par filière technologique, des principaux axes de développement photovoltaïques afin de mieux appréhender les potentialités de chacune. Ainsi, en comprenant mieux les fondamentaux, cela nous a permis de comprendre les propriétés de conversion de chaque solution technologique mais aussi ses limites. Nous proposons de partager cette vision globale des avancées technologiques avec le lecteur afin de pouvoir anticiper les besoins futurs et ainsi que chacun puisse se forger son propre avis sur le développement photovoltaïque du futur. Nous rappelons brièvement le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique reposant sur l'effet photoélectrique, c'est à dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Le domaine « Génie électrique » étant notre spécialité, nous nous sommes attachés à utiliser des modèles électriques simplifiés pour décrire le comportement des différentes cellules rencontrées tout au long de ce chapitre. La technologie photovoltaïque la plus utilisée depuis la création des premières cellules correspond à la filière silicium de type cristallin qui représente actuellement 90% de la production mondiale pour les applications terrestres. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'industrie photovoltaïque profite régulièrement du développement de l'industrie des semi-conducteurs qui est capable de fournir une matière première d'excellente qualité pour les panneaux solaires ainsi que des processus de fabrication totalement maîtrisés. Selon la qualité du silicium, nous rappelons les performances. Nous présentons ensuite le principe de fabrication des cellules multi-jonctions à haut rendement dont le

développement a été motivé en priorité par les applications spatiales où les performances de la cellule priment sur les coûts de fabrication. Nous parlons ensuite d'une des nouvelles générations de cellules solaires, qui utilise de nouveaux matériaux de type organique. Ces nouveaux composés, en particulier les polymères, pourraient révolutionner le marché du PV grâce à leur faible coût de fabrication et leur facilité d'utilisation (flexibilité, légèreté). La recherche dans ce domaine est extrêmement active depuis plusieurs années et les avancées sont rapides. Nous abordons enfin le large domaine des cellules PV dites couche mince (« Thin-Film ») qui constitue ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin. Leur principal atout vient de la faible quantité de matériaux nécessaire à la fabrication d'une cellule comparativement aux cellules classiques (première génération). Les cellules couche mince les plus développées utilisent comme matériau de base le silicium amorphe, le diSélénure de Cuivre Indium Galium (CIGS), le Tellure de Cadmium CdTe) et on trouve de plus en plus de cellules multi-jonction améliorant d'autant les performances de cette filière.

# **Chapitre I Technologies des cellules solaires photovoltaïques**

# **Chapitre I Technologies des cellules solaires photovoltaïques**

## **1 Introduction**

Les cellules solaires photovoltaïques, ou cellules PV, sont des composants essentiels des systèmes d'énergie solaire. Elles convertissent la lumière du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque, un phénomène physique dans lequel des photons (particules de lumière) excitent des électrons dans un matériau semi-conducteur, générant un flux d'électricité.

## **2 Types de technologies de cellules solaires**

### **2.1 Silicium multicristallin :**

- Les cellules solaires en silicium multicristallin sont fabriquées à partir de lingots de silicium formés par refroidissement rapide. Ces lingots présentent des cristaux de différentes tailles, ce qui peut entraîner des limites de rendement et d'efficacité légèrement inférieures par rapport au silicium monocristallin.
- Cependant, les cellules solaires multicristallines sont moins coûteuses à produire que les monocristallines en raison de leur processus de fabrication moins complexe.

### **2.2 Silicium monocristallin :**

- Les cellules solaires en silicium monocristallin sont fabriquées à partir d'un seul cristal de silicium pur, ce qui leur confère une structure uniforme et une plus grande efficacité énergétique par rapport aux cellules multicristallines.
- Les cellules monocristallines ont généralement un rendement énergétique plus élevé et prennent moins de place pour la même puissance installée, mais elles sont plus coûteuses à produire en raison de la complexité du processus de fabrication.

## **2.3 Cellules solaires minces :**

- Les cellules solaires minces sont fabriquées en déposant des couches minces de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium amorphe, le tellure de cadmium ou le sélénium-cuivre-indium-gallium-disulfure (CIGS) sur des substrats tels que le verre ou le plastique.
- Bien que les cellules solaires minces aient généralement un rendement énergétique plus faible que les cellules cristallines, elles peuvent être produites à moindre coût et sont souvent utilisées dans des applications où la légèreté et la flexibilité sont importantes, comme les applications portables ou intégrées dans des matériaux de construction.

Chacune de ces technologies présente des avantages et des inconvénients en termes d'efficacité, de coût et d'applications spécifiques. Le choix de la technologie de cellules solaires dépend souvent des besoins spécifiques du projet, de la disponibilité des ressources et des contraintes budgétaires.

### ***3 Explication des principes de fonctionnement de chaque type de technologie ;***

Chaque type de technologie de cellules solaires fonctionne selon des principes différents, mais ils partagent tous le même objectif : convertir la lumière du soleil en électricité. Voici une explication des principes de fonctionnement de quelques-unes des technologies de cellules solaires les plus courantes :

#### **3.1 Cellules solaires au silicium multicristallin :**

-Les cellules solaires au silicium multicristallin sont fabriquées à partir de lingots de silicium composés de cristaux de tailles variables.

-Lorsque la lumière solaire frappe la surface de la cellule, les photons sont absorbés par le matériau semi-conducteur en silicium, créant ainsi des paires électron-trou.

-Ces paires sont ensuite séparées par un champ électrique à l'intérieur de la cellule, créant un courant électrique qui est collecté par des contacts métalliques sur la surface de la cellule.

### **3.2 Cellules solaires au silicium monocristallin :**

- Contrairement aux cellules multicristallines, les cellules solaires au silicium monocristallin sont fabriquées à partir d'un seul cristal de silicium pur.

-Cette structure cristalline uniforme permet une meilleure efficacité énergétique et une performance plus élevée par rapport aux cellules multicristallines.

-Le principe de fonctionnement est similaire à celui des cellules multicristallines, où les photons absorbés génèrent des paires électron-trou, produisant ainsi un courant électrique.

### **3.3 Cellules solaires à couche mince :**

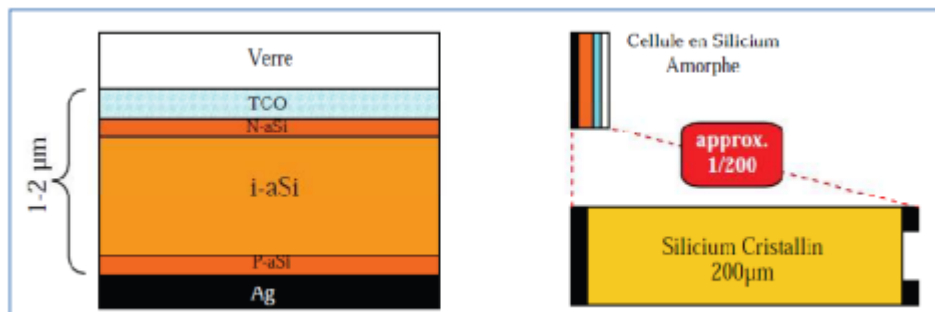
-Les cellules solaires à couche mince sont fabriquées en déposant une mince couche de matériau semi-conducteur, tel que le tellure de cadmium (CdTe) ou le sulfure de cadmium-indium (CIS), sur un substrat.

-Ces cellules utilisent des matériaux moins coûteux et nécessitent moins de matière pour leur fabrication que les cellules solaires au silicium.

-Le fonctionnement repose sur l'absorption directe des photons par la couche semi-conductrice mince, suivie de la création de paires électron-trou et de la génération d'un courant électrique.

Dans chaque type de technologie de cellules solaires, les photons de la lumière solaire excèdent l'énergie de la bande interdite du

matériau semi-conducteur, libérant ainsi des électrons. Ces électrons sont ensuite dirigés vers un circuit électrique externe pour générer de l'électricité. Les cellules solaires sont généralement assemblées en modules ou panneaux solaires pour former des systèmes photovoltaïques capables de produire de l'électricité à grande échelle.



**Figure 1 : Schéma de principe d'une cellule à base de silicium amorphe**

#### **4 Avantages et inconvénients de chaque type ;**

##### **4.1 Silicium multicristallin**

- Avantages :
- Coût de production relativement bas.
- Processus de fabrication moins énergivore que le silicium monocristallin.
- Inconvénients :
- Efficacité légèrement inférieure par rapport au silicium monocristallin.
- Moins performant dans des conditions de faible luminosité.

##### **4.2 Silicium monocristallin**

- Avantages :
- Efficacité élevée, offrant un meilleur rendement énergétique.
- Durabilité et longévité supérieures grâce à sa structure cristalline uniforme.

- Inconvénients :
- Coût de production plus élevé en raison du processus de fabrication plus complexe.
- Plus sensible aux températures élevées et à l'ombrage, ce qui peut réduire son rendement.

#### **4.3 Cellules solaires à couche mince :**

- Avantages :
- Coût de production potentiellement plus bas grâce à l'utilisation de moins de matériaux.
- Meilleure performance dans des conditions de faible luminosité et à des températures élevées.
- Inconvénients :
- Efficacité généralement plus faible que les cellules en silicium, bien que cela varie selon le matériau utilisé.
- Moins de durabilité à long terme par rapport aux cellules en silicium.

En résumé, chaque type de technologie de cellules solaires présente ses propres avantages et inconvénients, ce qui rend important de choisir la technologie la mieux adaptée en fonction des besoins spécifiques d'une application donnée, de l'environnement d'installation et du budget disponible.

## **5 Généralités sur les technologies des cellules solaires**

### **5.1 Introduction**

Les semi-conducteurs sont des matériaux utilisés pour la fabrication des dispositifs électroniques et optoélectroniques.

Nous aborderons ainsi en premier lieu quelques notions sur la source d'énergie que représentent le soleil, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous décrirons ensuite le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales, les pertes physiques et technologiques limitant le



rendement des cellules photovoltaïques. On se base sur les pertes optiques.

## **5.2 Notions préliminaires sur le rayonnement solaire**

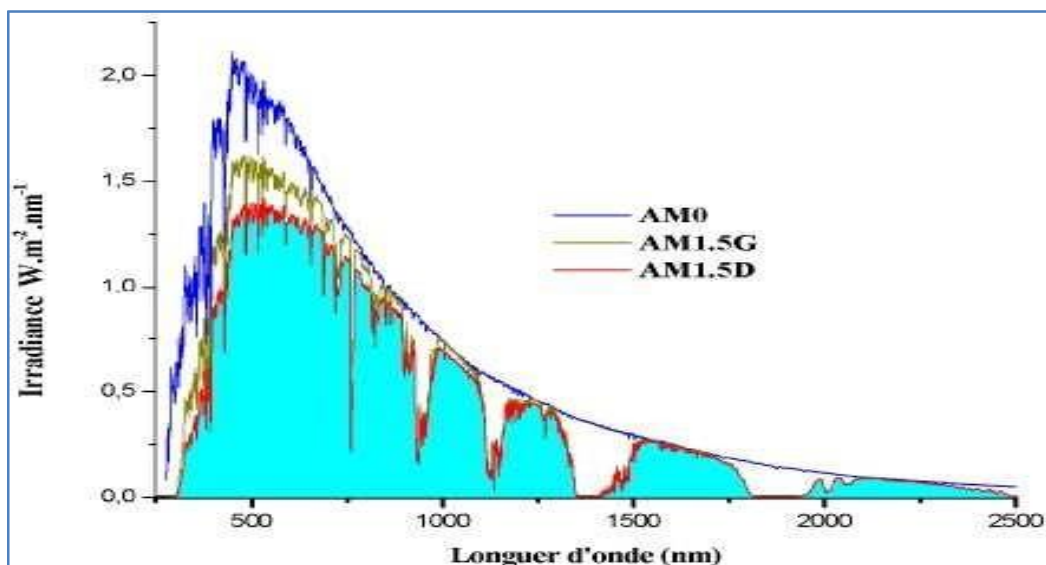
Le développement, l'optimisation et la caractérisation des cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée (le soleil). La surface de celui-ci se comporte comme un corps noir à la température d'environ  $5800K$ . Ceci conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de  $0,5 \mu m$  pour une puissance d'environ  $60 MW/m^2$ , soit un total de  $9,5 \cdot 10^{25} W$ . En tenant compte de la surface apparente du soleil et de la distance entre celui-ci et la terre, cela conduit à un éclairage moyen dans l'année de  $1,36 kW/m^2$  hors atmosphère.

Afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, il a été institué la notion d'Air Mass (AM), elle quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle  $\theta$  du soleil par rapport au zénith :

Si le soleil est au zénith du lieu d'observation,  $\theta = 0^\circ$ ,  $AM=1$  : la notation utilisée est AM1. AM0 correspond à l'irradiante hors atmosphère, et est surtout utilisée pour prédire le comportement des cellules pour applications spatiales. Le spectre standard le plus étudié est AM1.5G, G signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses, par opposition à AM1.5D qui ne tient compte que des directes. AM1.5G donne une irradiante de  $970 \text{ W/m}^2$ , mais a été arrondi à  $1 \text{ kW/m}^2$ .

L'intensité  $I_d$  reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la formule empirique suivante:  $I_d = 1,353 \cdot (0.7^{AM})^{0.678}$ [2]

Avec  $I_d$  en  $\text{kW/m}^2$ , pour une surface perpendiculaire aux rayons incidents. Les spectres AM0 et AM1.5 sont représentés sur la figure



**Figure 2: Représentation graphique des spectres AM0 et A**

Il apparaît que la partie la plus importante des spectres solaire à la surface de la terre concerne le domaine du visible et du proche infrarouge.

Les irradiances définies par le nombre AM ne tiennent toutefois pas compte de la variété des conditions climatiques, et de l'altitude du lieu. La terre présente ainsi de grandes disparités dans la répartition de la puissance solaire:

Les pays du Maghreb ont un potentiel solaire élevé. Les taux

d'irradiation solaire effectués par satellites par l'Agence Spatiale Allemande (DLR), montrent des niveaux d'ensoleillement exceptionnels de l'ordre de 1200 kWh/m<sup>2</sup>/an dans le Nord du Grand Sahara. Par contre, les meilleurs taux d'irradiation solaire en Europe sont de l'ordre de 800 kWh/m<sup>2</sup>/an limités à la partie sud de l'Europe Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande(ASA)

aconclu,quel'Algériereprésentelepotentielsolaireleplusimportantdetout le bassin méditerranéen, soit:

169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque et 35TWh/an pour l'éolien .La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau duterritoirealgérienestprésentéedansleTableauI.1,selonl'ensoleillementreçuannuellement:

<b>Régions</b>	<b>Littoral</b>	<b>Hauts Plateaux</b>	<b>Sahara</b>
Superficie(%)	4	10	86
Ensoleillement(h/an)	2650	3000	3500
2 Energie moyenne reçue(kWh/m/an)	1700	1900	2650

**Tableau I.1:Ensoleillement reçu annuelle mentent Algérie par région climatique**

## 6 Principe de fonctionnement d'une cellule +photovoltaïque

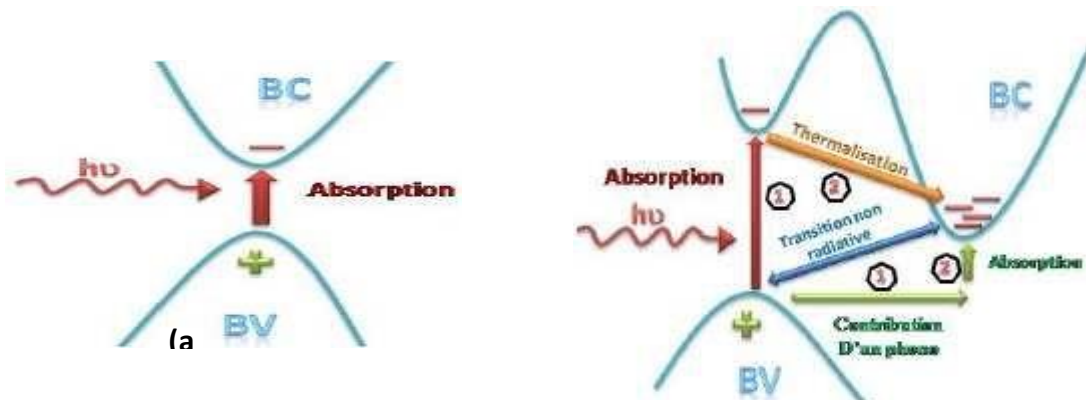
L'effetphotovoltaïqueaétémisenévidencepourlapremièrefoisparE.Becquerelen1839,ildécouvritquecertainsmatériauxdélivraientunepetitequantitéd'électricitéquandilsétaient exposés à la lumière. Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1912,mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique dans laréalisationd'unecellulephotovoltaïqueensiliciumd'unrendementde4,5%.Nousprésentons ici les mécanismes de la génération de porteurs électroniques au sein d'un semi-conducteur sous l'impact de photons.

## 6.1 L'interaction photon/semi-conducteur

L'écart entre la bande de valence et de conduction, ou *gap*, représente une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs. La figure I.2 présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des  $k$ , il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives. Ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires, tels que le GaAs, beaucoup utilisés en optoélectronique.

Dans le cas du silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon.

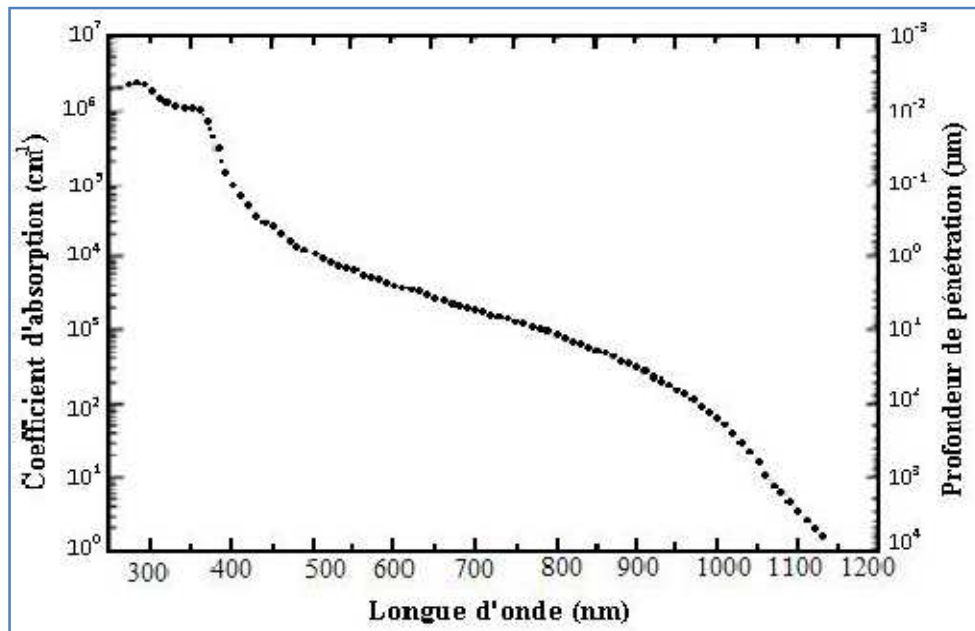
Notons que la valeur du gap indirect du silicium est de  $1,12 \text{ eV}$  à  $300 \text{ K}$  (ce qui correspond à une longueur d'onde de  $1107 \text{ nm}$ ), mais celle du premier gap direct vaut  $3,4 \text{ eV}$  (soit  $365 \text{ nm}$ ).



**Figure 3 :** Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur

L'interaction entre les photons et un semi-conducteur traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque : le coefficient d'absorption. Il traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde. La figure 1.3 nous donne celui du silicium. Nous constatons que pour des longueurs d'ondes inférieures à 365 nm, la majorité des photons incidents est absorbée dans les 100 premiers Å du matériau.

Comme nous l'avons vu précédemment, ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'ondes plus grandes. Il faut alors qu'un phonon au moins vienne assister l'électron pour que ce dernier passe dans la bande de conduction. Ceci réduit la probabilité de transition. L'augmentation de la longueur d'onde des photons entraîne donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau (à l'énergie d'un phonon près), la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé.



**Figure 4** : Coefficient d'absorption du silicium

L'interaction photon /électron au sein du semi-conducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie

localement la conductivité du matériau. Notons que nous nous situons dans un régime de faible injection, c'est à dire que la densité de porteurs photogénérés est faible devant celle des porteurs majoritaires au sein du matériau. Ainsi cet excès de porteurs est plus sensible dans le cas des porteurs minoritaires (trous dans la région dopée n et électrons dans celle dopée p). La cellule photovoltaïque se comportant comme un générateur, il s'agit à présent de séparer ces deux types de porteurs pour éviter qu'ils ne se recombinent entre eux, et de les collecter dans un circuit électrique extérieur.

L'absorption est caractérisée par le taux de génération optique, noté  $G$  : il s'agit du taux de création de paires électron-trou (en  $cm^{-3}.s^{-1}$ ). Les porteurs minoritaires (électrons dans un matériau de type p et trous dans un matériau de type n) sont métastables et n'existeront, en moyenne, que pour un temps égal à la durée de vie  $\tau$  des porteurs minoritaires. Cette grandeur définit la durée de vie moyenne avant que les porteurs ne se recombinent et est liée à la longueur de diffusion  $L_D$  et au coefficient de diffusion  $D$  du matériau par la relation :

$$L_D = \sqrt{D\tau}$$

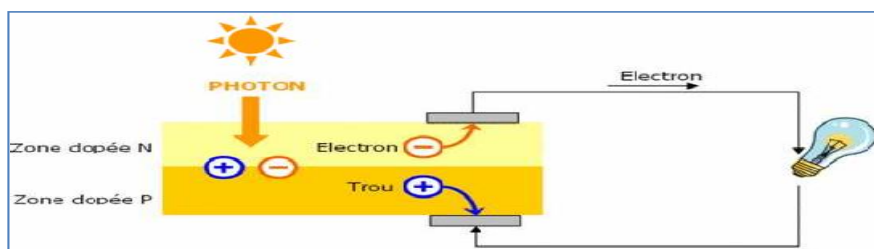
## 6.2 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule PV est formée d'une jonction p-n qui permet de séparer spatialement l'électron et le trou photo générés grâce à la variation du potentiel électrochimique au sein de la structure. Une paire électron-trou photogénérée dans la zone de charge d'espace (ZCE) est immédiatement dissociée par le champ électrique : les trous sont accélérés vers la zone p et les électrons vers la zone n. On a un photocourant de génération.

Dans les zones n ou p, les porteurs minoritaires photogénérés diffusent et ceux qui atteignent la ZCE (dépendant de la longueur de diffusion  $L_D$  de ces porteurs) sont propulsés vers la région dans laquelle ils deviennent

majoritaires, où ils peuvent être collectés par les contacts ohmiques. On a un photo courant de diffusion. Ces deux contributions s'ajoutent pour donner le photocourant résultant  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires proportionnel à l'intensité lumineuse. Ce courant s'oppose au courant de diode, appelé courant d'obscurité  $I_{obs}$ , qui résulte de la polarisation du composant. Le courant résultant  $I$  est :

$$I = I_{obs} - I_{ph} \quad (qV)$$



**Figure 5 : L'effet photovoltaïque**

$$I_{obs} = I_0 (e^{nkT} - 1)$$

Où:  $q$ : charge élémentaire ( $q = 1.6 \cdot 10^{-19} C$ )

$K$  : constante de Boltzmann ( $k = 1.38 \cdot 10^{-23} J.K^{-1}$ )

$T$  : température ( $K^\circ$ )

$V$ : tension aux bornes de la jonction (Volt)  $I_0$  est le courant de saturation en inverse de la diode. Le coefficient  $n$  est le facteur d'idéalité de la diode. Le coefficient  $n$  est le facteur d'idéalité de la diode. Le coefficient  $n$  est le facteur d'idéalité de la diode. Le coefficient  $n$  est le facteur d'idéalité de la diode.

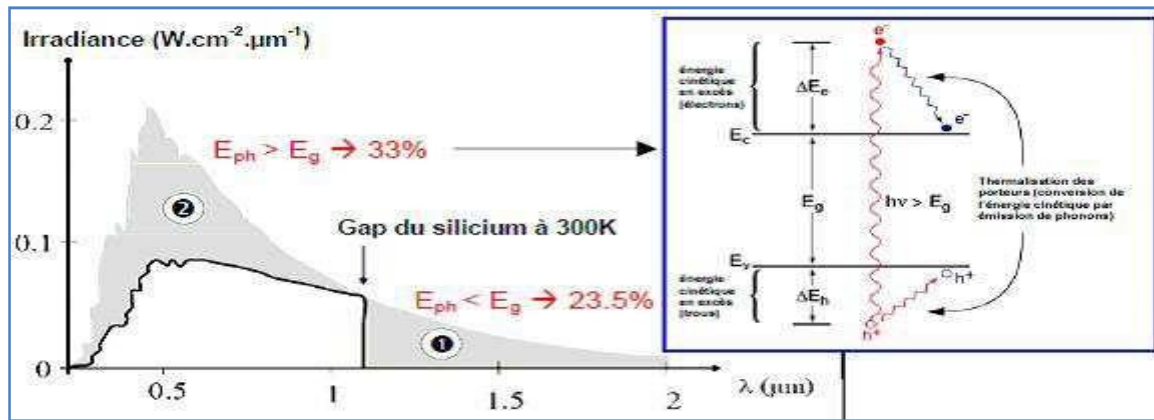
la diode. Le coefficient  $n$  est le facteur d'idéalité de la diode, fonction de la qualité de la jonction (égal à 1 si la diode est idéale et égal à 2 si la diode est entièrement gouvernée par la génération/recombinaison) Avec:

La longueur de diffusion des électrons photogénérés est plus grande que celle des trous.

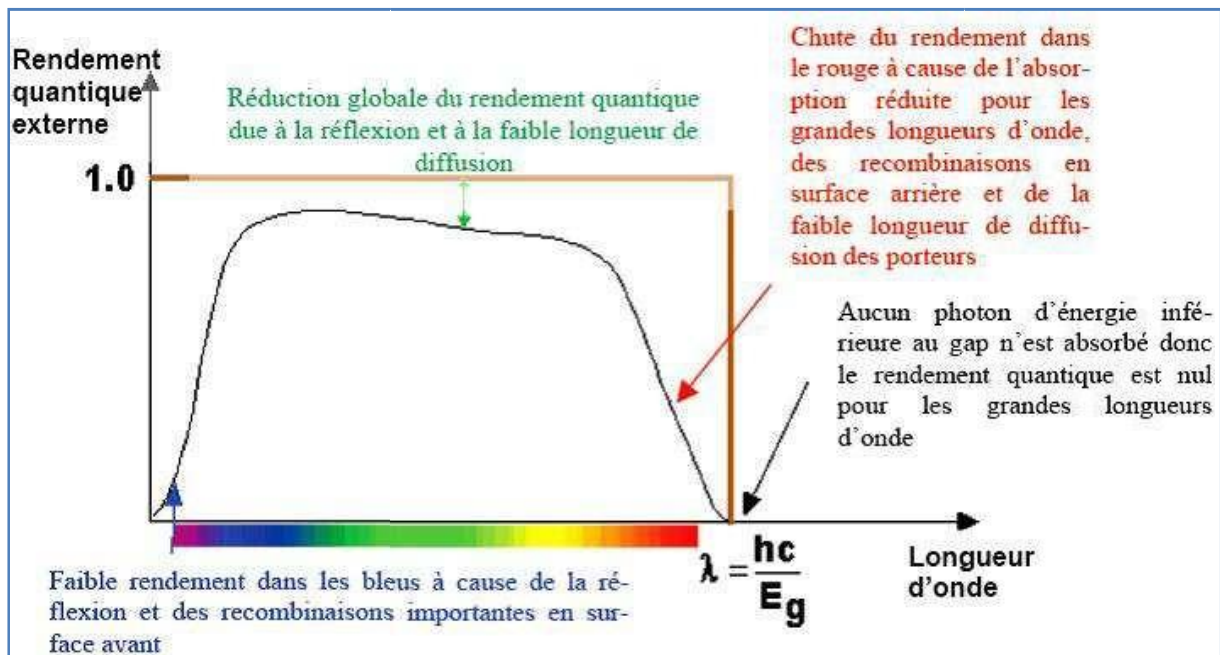
La base présente une épaisseur relativement grande ( $\approx 250-300 \mu m$ ) et elle est donc le plus souvent de type p : elle va fournir le plus de porteurs. Afin de limiter les recombinaisons avec les porteurs majoritaires, elle est faiblement dopée (environ  $10^{16} cm^{-3}$ ). L'émetteur, de type n, est de faible épaisseur ( $\approx 0.2 \mu m$ ) et fortement dopé (environ  $10^{20} cm^{-3}$ ) afin d'obtenir un champ électrique suffisant dans la ZCE ( $\approx 0.3 \mu m$ ). L'épaisseur de la cellule doit être choisie de manière à ce qu'un maximum des photons soit absorbé par le silicium, tout en tenant compte des contraintes de découpe du matériau.

Même si nous ne l'aborderons pas dans ce travail, il est intéressant de noter que les cellules photovoltaïques en silicium de type n suscitent actuellement un intérêt important et que de nombreuses recherches sont menées sur ce matériau jusqu'ici sous-estimé .





**Figure 6 : Principales pertes intrinsèques pour une cellule photovoltaïque.**



**Figure 7 :Rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque**

## 6.3 Électricité photovoltaïque

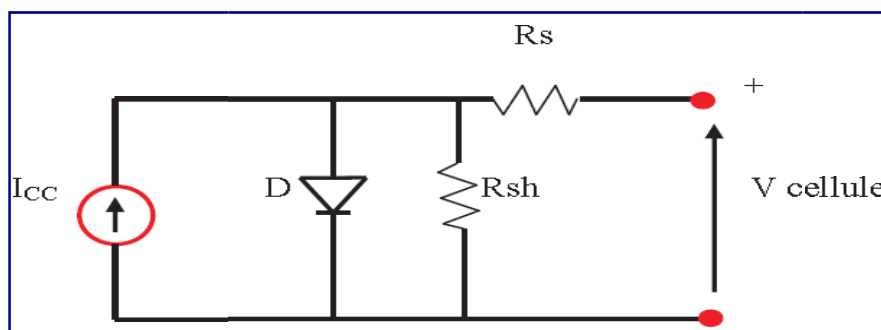
### 6.3.1 La cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques ou les plaques solaires sont des composants Optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un Processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par E. Becquerel en 1839.

Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu' à 100 cm<sup>2</sup> ou plus sa forme est circulaire ,carrée ou dérivée des deux géométries.

Les cellules se branchent en série, ce qui permet aux électrons générés par une cellule d'être repris par la suivante. Le but est d'avoir une différence de potentiel normalement entre 6 et 24V.lafigure(I.8)suivante représente les schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.



**Figure 8 :Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque**

La cellule PV peut se modéliser à partir de l'équation :

$$I = I_{cc} - I_s \left( \exp^{\frac{V + R_s \times I}{n \times V_T}} - 1 \right) - \frac{V + R_s \times I}{R_{SH}}$$

$$\text{Ou : } V_T = \frac{KT}{q}$$

Avec:

IS(A)courant de saturation

VT(V)potentiel thermodynamique

K(J.K)constante de Boltzmann( $1.380 \times 10^{-23}$ J/K)

T (K) température effective

de la cellule charge de

l'électron( $1.602 \times 10^{-19}$ C)n

facteur de non idéalité de la  
jonction

$I(A)$  courant fourni par la cellule

$V(V)$  tension aux bornes de la cellule

$ICC (A)$  courant de court-circuit de la cellule dépendant de  
l'ensoleillement et de la température

$R_{sh}(\Omega)$  résistance de shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction

$R_s(\Omega)$  résistances en série représentant les diverses résistances des contacts et de  
connexion

### 6.3.2 La jonction PN utilisé comme un capteur

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dopé N et d'un semi-conducteur dopé P. La jonction entraîne l'égalisation des niveaux de Fermi par décalage des bandes. Si l'on applique une tension positive du côté de la région P, les porteurs majoritaires positifs (les trous) sont repoussés vers la jonction. Dans le même temps, les porteurs majoritaires négatifs du côté N (les électrons) sont attirés vers la jonction. Arrivés à la jonction, soit les porteurs se recombinent (un électron tombe dans un trou) en émettant un photon éventuellement visible (LED), soit ces porteurs continuent leur course au travers de l'autre semi-conducteur jusqu'à atteindre l'électrode opposée : le courant circule, son intensité varie en exponentielle de la tension.

Si la différence de potentiel est inversée, les porteurs majoritaires des deux côtés s'éloignent de la jonction, bloquant ainsi le passage du courant à son niveau. Ce comportement asymétrique est utilisé notamment pour redresser le courant alternatif.

La jonction P-N est à la base du composant électronique nommé diode, qui ne permet le passage du courant électrique que dans un seul sens. De manière similaire, une troisième région peut être dopée pour former des doubles jonctions N-P-N ou P-N-P qui forment les transistors bipolaires. Dans ce cas-là, les deux semi-conducteurs de même type sont appelés l'émetteur et le collecteur. Le semi-conducteur situé entre l'émetteur et le collecteur est appelé la base, et a

une épaisseur de l'ordre du micromètre. Lorsqu'on polarise la jonction émetteur-base en direct, celle-ci est passante alors que la jonction base-collecteur est bloquée. Cependant la base est assez fine pour permettre aux nombreux porteurs majoritaires injectés depuis l'émetteur (fortement dopé) de la traverser avant d'avoir le temps de se recombinaison.

Ils se retrouvent ainsi dans le collecteur, produisant un courant contrôlé par la tension de base.

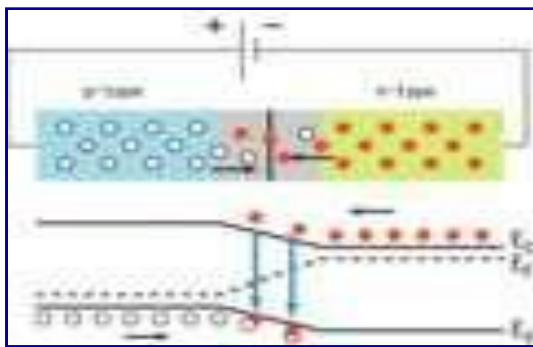


Figure 9: Jonction P-N en polarisation directe.

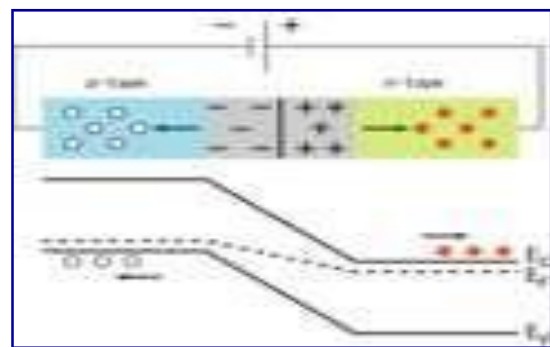


Figure 10 : Jonction P-N en polarisation inverse

## 6.4 Le générateur PV et ses performances

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert.

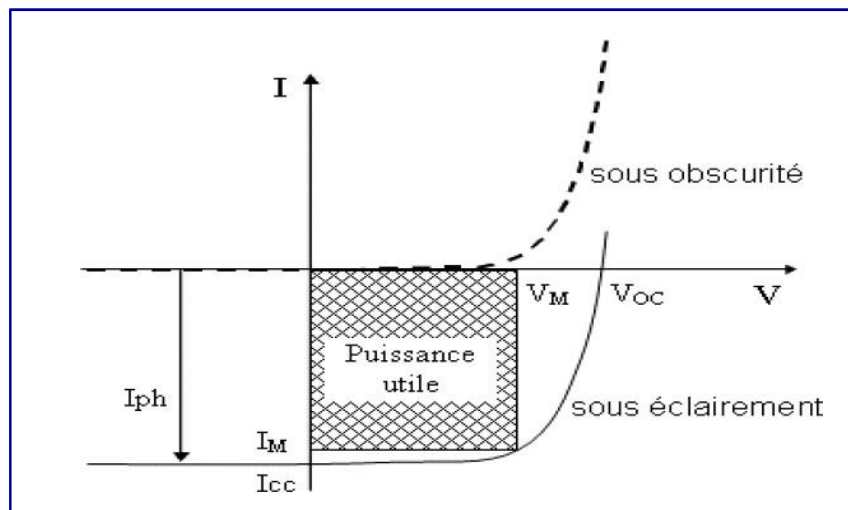
### 6.4.1 Caractéristiques courant/tension

La courbe de la caractéristique d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum ne produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

Cette courbe est établie dans des conditions ambiantes de fonctionnement données (répartition du rayonnement donnée, cellule PV à une température donnée, air ambiant circulant à une vitesse donnée).

En effet, le fonctionnement des cellules photovoltaïques dépend des conditions d'ensoleillement et de température à la surface de la cellule. Ainsi, chaque courbe courant-tension correspond à des conditions spécifiques de fonctionnement.

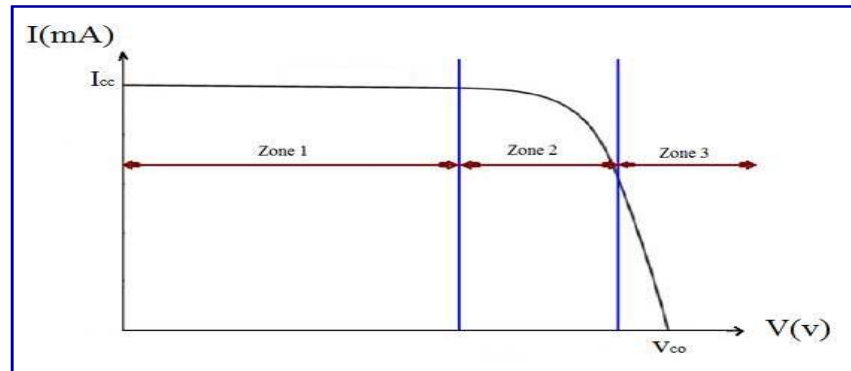
À température fixés, pour les deux régimes (sous obscurité et sous éclairement) la caractéristique courant / tension d'une cellule allure suivante:



**Figure 11:** La caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Cette caractéristique est décalée vers le bas d'un courant  $I_{cc}$  (courant de court-circuit). De même, elle coupe l'axe des abscisses en  $V_{co}$  (tension maximale de circuit ouvert).

On peut regrouper trois zones essentielles:



**Figure12** :les différentes zones de caractéristique  $I=f(V)$  d'une cellule photovoltaïque

**La zone 1** : où le courant reste constant quelle que soit la tension. Pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

**La zone 2** : correspondant au coude de la caractéristique. La région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur ,où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

**La zone 3** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante .Dan ce cas ,le générateur est assimilable à un générateur de tension.

#### 6.4.2 Courant de court-circuit( $I_{cc}$ )

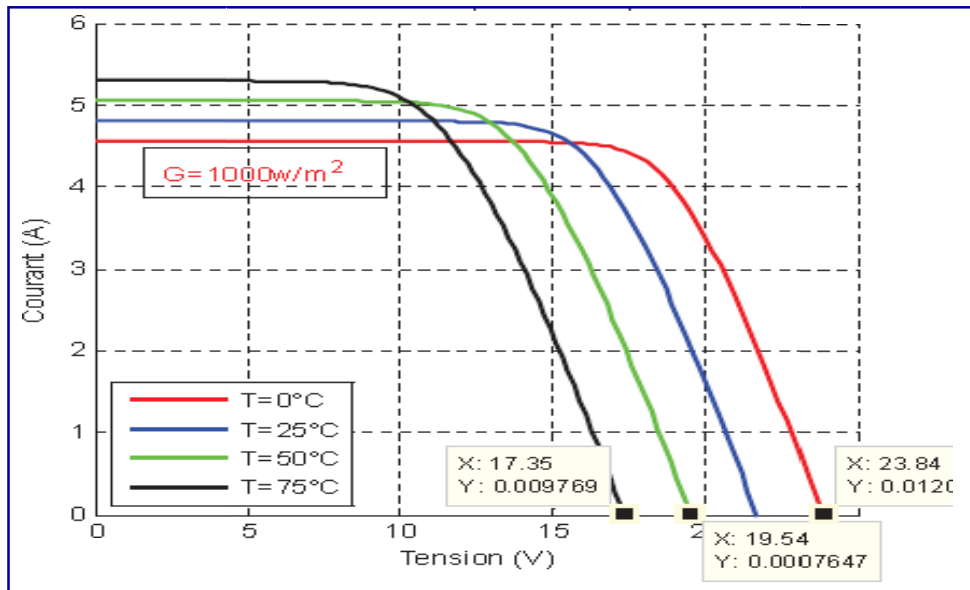
Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température

#### 6.4.3 Tension à circuit ouvert( $V_{co}$ )

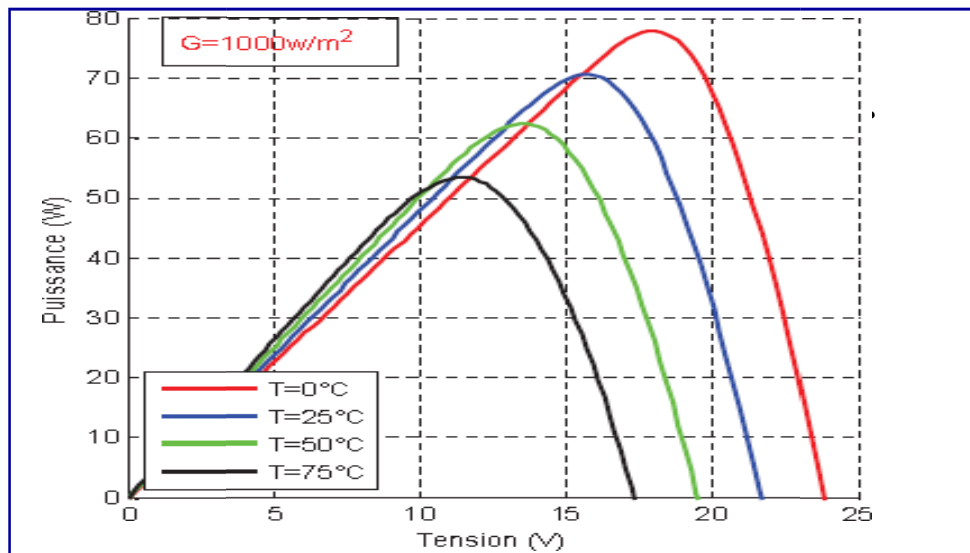
a tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie, et décroît avec la température. Elle varie peu avec l'intensité lumineuse



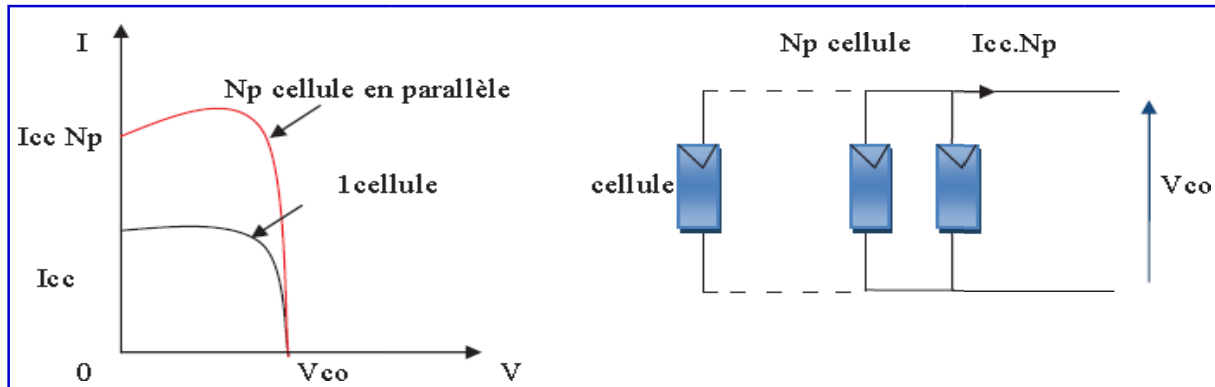




**Figure13:**La caractéristique de  $I=f(V)$  en fonction de température



**Figure14:** La caractéristique de  $P=f(V)$  en fonction de température



**Figure15** :Caractéristique courant tension de ( $N_p$ ) cellule en parallèle

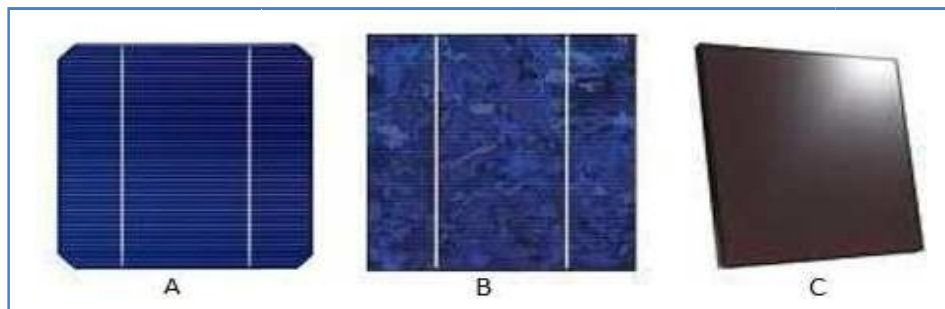
### ***A :Les Différents Types de Cellules Photovoltaïques***

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium(Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), de sulfure de cadmium (CdS), de tellure de cadmium(CdTe)oud.arséniuredegallium(GaAs).Lesiliciumestactuellementlematériau

leplusutilisépourfabriquerlescellulesphotovoltaïques,carilestrèsabondant dansla nature. On le trouve dans la nature sous forme de pierre de silice. La silice est un composé chimique (dioxyde de silicium) et un minéral de formule  $SiO_2$ . Il est le principal constituant des roches sédimentaires détritiques (sables,grès)[1].

Les différents types de cellules PV existants sont:

- ✚Cellule en silicium amorphe(rendement:6à10%)
- ✚Cellule en silicium monocristallin(rendement:13à17%)
- ✚Cellule en silicium polycristallin(rendement:11 à15%)
- ✚Cellule Tandem
- ✚Cellule en matériaux organiques(rendement:3.6%)



**Figure 16:** Types de cellules photovoltaïques. (A) silicium monocristallin, (B) silicium polycristallin, (C) silicium amorphe

### ***B :Silicium cristallin***

Le silicium fait partie de la quatorzième colonne du tableau périodique de Mendeleïev.

Le silicium est un élément dit cristallo-gène, i.e. il existe une forme cristalline du silicium. En effet, le silicium, de même que le germanium se cristallise en une structure de type "diamant"

: la maille élémentaire (représentée en Fig I-

24) est cubique à faces centrées avec la moitié des sites tétraédriques occupés. Le paramètre de maille du cristal de silicium est de  $5.431 \text{ \AA}$ , pour des conditions normales de pression et de température.

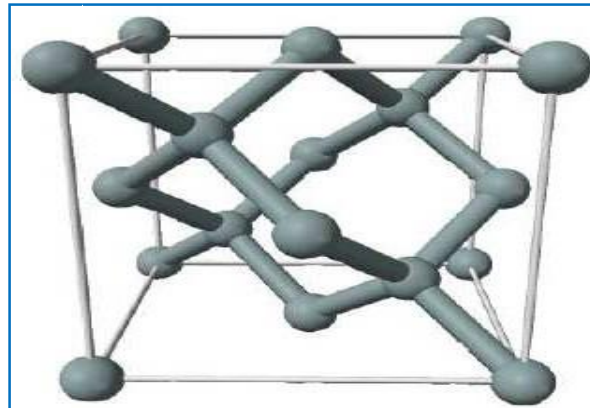
Le silicium (Si) ainsi que les autres éléments de la colonne IV du tableau périodique forment des cristaux covalents. Ces éléments génèrent des liaisons covalentes avec leurs quatre atomes voisins, en mettant en commun leurs quatre électrons de valence. Les électrons de valence

dans le cas du silicium ont une énergie de liaison de  $1.12 \text{ eV}$  à température ambiante

(intermédiaire entre celle du diamant (isolant) et celle de l'étain qui est un bon conducteur) faisant de lui un semi-conducteur.

Grâce au procédé Czochralski permettant l'obtention de silicium ultra pur, et à la possibilité d'ajuster le comportement électronique du

silicium via l'incorporation d'éléments comme le bore ou le phosphore dans le cristal (dopage), que la porte s'est ouverte à de nombreuses applications en électronique et autre application shigh-tech.



**Figure17:Maille élémentaire d'un cristal de silicium**

- **Les cellules multi-jonctions à haut rendement.**

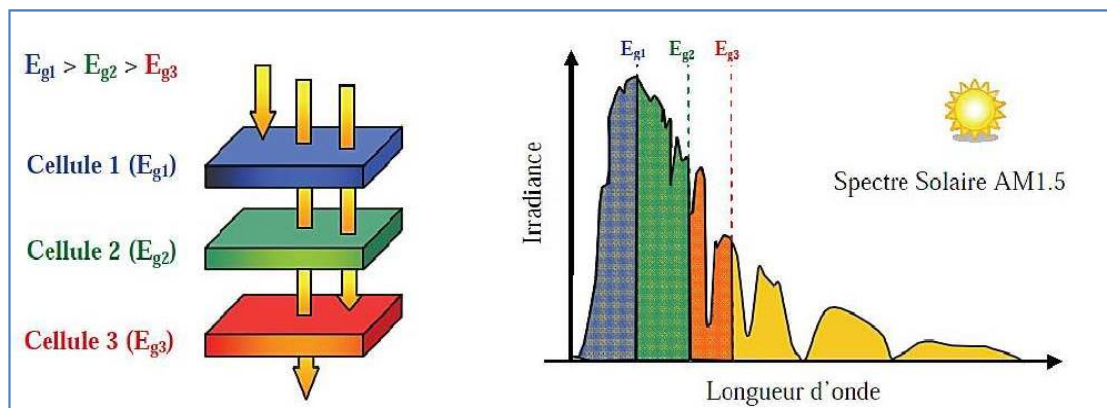
Aujourd'hui, la plupart des cellules photovoltaïques inorganiques sont constituées

d'une simple jonction PN. Dans cette jonction, seuls les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à la bande interdite du matériau (notée  $E_g$  en eV) sont capables de créer des paires électron-trou. En d'autres termes, la réponse photovoltaïque d'une cellule simple jonction est limitée. Seule la proportion du spectre solaire dont l'énergie des photons est supérieure au gap d'absorption du matériau est utilisable.

D'autre part, même si l'énergie des photons est suffisante, la probabilité de rencontrer un électron est faible. Ainsi, la plupart des photons traversent le matériau sans avoir transféré leur énergie. Une première réponse pour limiter les pertes est connue depuis longtemps. Du point de vue technologique, il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants, (Figure I-24). Ainsi il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de

conversion très importants.

Des cellules PV multi-jonctions à base d'associations de matériaux semi-conducteurs III-V (GaAs, AlGaAs, InGaAs, etc) ont ainsi été mises au point depuis les années 60 présentant des rendements très élevés supérieurs parfois à 40%. Elles ne sont pas connues du grand public à cause de leur coût de fabrication, de loin, les plus élevés actuellement (fabrication sous ultraviolette, croissance très lente, problème de casse et de défauts aux interfaces)



**Figure 18.** Principe de la cellule à hétéro jonction

Le développement des cellules à haut rendement a été motivé en priorité par les applications spatiales. En effet, dans ce domaine, le critère principal n'est pas le prix par watt crête (€/Wc) mais plutôt le nombre de watts par kilogramme (Wc/kg). Il faut savoir qu'envoyer un satellite dans l'espace coûte entre 3.000€ et 30.000€ par kilogramme (le prix dépend de l'altitude de mise en orbite).

Dès lors, il est compréhensible qu'on utilise les technologies photovoltaïques les plus performantes afin d'optimiser le poids de l'ensemble et faire en sorte qu'il soit le plus long temps possible autonome. Un dernier avantage à signaler pour ces cellules est leur robustesse vis-à-vis des radiations et des impacts. Au cours du temps, ces cellules ont démontré qu'il était possible d'avoir des générateurs d'énergie qui vieillissent très bien et qui peuvent produire de l'énergie même en ayant subi quelques détériorations. Le rendement des modules commercialisés contenant des cellules multi-jonction actuellement avoisine les

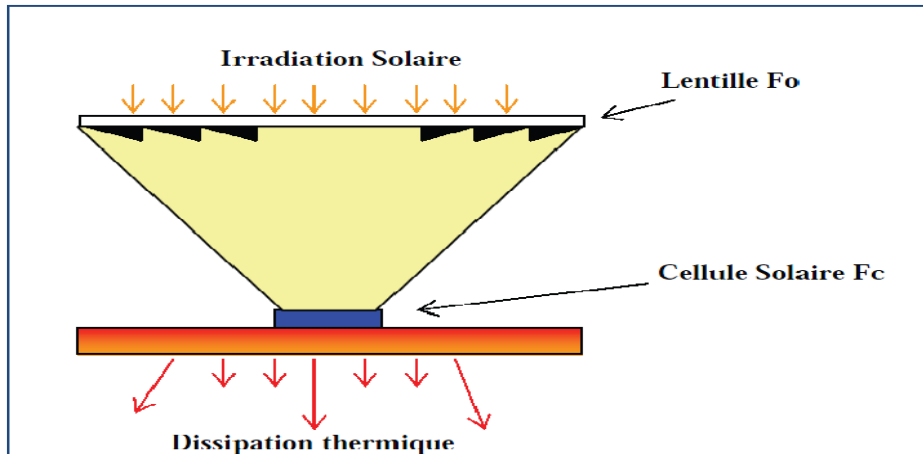
30% pour un spectre AM0. Certaines recherches se concentrent sur l'amélioration des technologies de fabrication pour en baisser le coût et les adapter aux besoins terrestres. Ils s'affrontent principalement aux problèmes d'interfaces et de passage de petits volumes de fabrication à des grandes quantités. Aujourd'hui, les véhicules de courses terrestres et/ou maritimes en utilisent pour assurer leur autonomie. Mais cela reste des cellules beaucoup trop chères pour des applications domestiques.

En utilisant des concentrateurs solaires, certains pensent pouvoir baisser les prix (moins de surface de cellule utilisée) et prendre une place dans le marché conventionnel terrestre. Ainsi, si on compare le meilleur rendement sans concentrateur d'une triple jonction GaInP/GaAs/Ge atteignant les 32%, cette même cellule arriverait à 40.7% avec concentrateur

On peut même envisager des rendements encore plus importants avec des cellules complexes de 4 à 6 jonctions voir plus. L'idée basique du concentrateur photovoltaïque (CPV) est de réduire le prix de revient d'un système PV en focalisant les rayons lumineux sur une cellule solaire de surface  $F_c$  par le biais d'une lentille optique de surface  $F_o$ . Le ratio de concentration  $C$  est approximativement  $C = F_o / F_c$  comme indiqué en Figure I-25.

La réduction de la surface des cellules permet d'utiliser des cellules plus performantes qui étaient encore trop chères pour être utilisées sur de grandes surfaces de modules PV.

En pratique, la plus grande différence à noter entre un GPV composé de modules PV classiques et un CPV est la nécessité d'ajuster pour ce dernier l'orientation du système pour suivre la course du soleil. En effet, un mauvais angle de pénétration de la lumière pourrait priver complètement les cellules de lumière, d'autant plus que ces capteurs ne peuvent utiliser que le rayonnement direct du spectre solaire.



**Figure 19.** Schéma de principe d'un concentrateur photovoltaïque

Cette fonction, réalisée par un système suiveur ou tracker, doit être prise en compte dans le prix global du CPV et représente une part non négligeable de l'investissement. En tenant compte de ce système encore trop coûteux pour le grand public, le nombre d'exemples de centrales solaires à concentration montrent cependant bien l'intérêt de ces systèmes et leur viabilité [19,20]. Ils sont aujourd'hui destinés aux très grandes centrales énergétiques dépassant la centaine de kW. Des problèmes thermiques liés à la concentration des rayons sur les cellules nécessitent un dispositif de dissipation thermique performant. Une technique intéressante permet d'allier la production solaire photovoltaïque à la production solaire thermique, en récupérant la chaleur émise, par le biais d'un liquide caloporteur, et ainsi créer également un chauffe-eau solaire. Pour en faire des cellules organiques PV à part entière dans le futur, il faut améliorer les propriétés de création de paires électron-trou dans des molécules organiques ou des polymères mais également développer des méthodes de séparation des paires (e-t) en associant un matériau accepteur et un matériau donneur, grâce à des positions différentes des bandes énergétiques. On parle dans ce contexte de matériaux LUMO et HOMO. Un des points les plus difficiles est la séparation de ces deux phases qui ont tendance à se mélanger car les matériaux sont solubles l'un avec l'autre. Cependant une avancée

importante a permis de séparer spontanément les donneurs et les accepteurs en rendant les matériaux non solubles

Dans le cas des polymères, tout se passe comme si on avait deux catégories de fibres intimement mélangées, l'une conduisant les électrons et l'autre les trous

D'autres recherches se sont orientées vers un modèle de cellule photovoltaïque à la fois organique et inorganique (cellules hybrides) qui offre de nombreux avantages par rapport aux cellules traditionnelles. Ainsi, il a été élaboré une cellule nanocristalline qui imite la photosynthèse des plantes. Utilisées depuis longtemps dans les lasers à colorants ou les matériaux pour l'optique, l'utilisation efficace des molécules de colorants organiques dans le domaine du photovoltaïque, fut découvert en 1991 par Michael Graetzel. Des molécules organiques pigmentées (colorant), absorbent la lumière et libèrent ainsi des électrons. Les électrons sont véhiculés vers l'anode par une couche poreuse de dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ), un matériau semi-conducteur inorganique. A l'anode, les électrons sont dirigés vers un circuit externe où leur passage produit de l'énergie électrique

Le rendement de ces cellules solaires organiques est encore inférieur à 3% à cause justement de la nature du mélange et des problèmes de recombinaisons électroniques

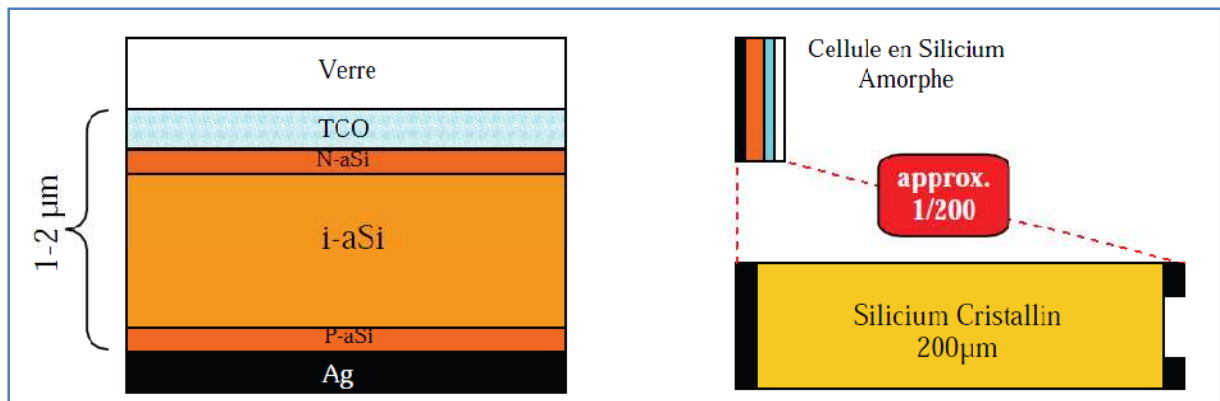
L'oxydation de la cellule est encore un autre problème auquel il faut se pencher en recherche pour trouver des solutions viables à long terme. Malgré tous ces inconvénients, le développement de ces cellules est prometteur à l'avenir



nvénients, ledéveloppement de ces cellules est prometteur à l’avenir car elles présentent une grande facilitédefabrication. Eneffet, les matériauxactifspeuvent s’étalersurde grandessurfaces.

Comme ces cellules peuvent facilement se développer sur matériaux souples, leur flexibilitéquasi naturelle comme le montre la Figure I-28 est également un atout. Le coût de ces cellulesorganiquesestinférieuràceluidescellulesàcolorantsetellespeuvent mêmeêtrebiodégradables. Les cellules solaires organiques avec leurs faibles coûts de matière première,leurs faibles besoins énergétiques de production et leurs capacités à être fabriquées à grandeéchelle sont des candidates sérieuses à fort potentiel de développement photovoltaïque à longterme.





**Figure 20** :Schéma de principe d'une cellule à base de silicium amorphe

## **7.1 Présentation du processus de fabrication des cellules solaires.**

La présentation du processus de fabrication des cellules solaires est essentielle pour comprendre comment ces dispositifs sont produits à partir des matériaux de base jusqu'au produit final. Voici une vue d'ensemble du processus de fabrication des cellules solaires photovoltaïques :

**7.1.1 Préparation des matériaux :** Le processus commence par la préparation des matériaux de base, principalement du silicium. Le silicium est extrait de la silice, généralement sous forme de quartz, puis purifié pour atteindre une pureté élevée nécessaire à la fabrication des cellules solaires.

**7.1.2 Formation des lingots de silicium :** Le silicium purifié est fondu et coulé pour former de grands lingots cristallins. Ces lingots sont généralement soit multicristallins (avec des grains multiples) soit monocristallins (avec un seul grain).

**7.1.3 Tranchage des lingots :** Les lingots de silicium sont ensuite tranchés en fines tranches appelées wafers. Les wafers monocristallins sont coupés à partir de lingots monocristallins, tandis que les wafers multicristallins sont coupés à partir de lingots multicristallins.

**7.1.4 Dopage :** Les wafers sont ensuite dopés avec des impuretés pour créer des zones de type P (positives) et de type N (négatives), ce qui est essentiel pour la génération d'un champ électrique à l'intérieur de la cellule solaire.

**7.1.5 Formation de la structure de la cellule :** Les wafers dopés sont ensuite assemblés en cellules solaires. Habituellement, une couche antireflet est déposée sur le dessus pour réduire la réflexion de la lumière, suivie de la formation d'une couche

transparente conductrice (TCO) et de la déposition de la couche active photovoltaïque, généralement composée de silicium.

**7.1.6 Encapsulation :** Une fois la structure de la cellule formée, elle est encapsulée dans un matériau transparent (généralement du verre) pour la protéger des éléments extérieurs tout en permettant le passage de la lumière solaire.

**7.1.7 Finition et assemblage des panneaux solaires :** Les cellules solaires individuelles sont ensuite assemblées en modules ou panneaux solaires. Cela implique généralement de connecter électriquement les cellules entre elles et d'ajouter un cadre pour renforcer la structure du panneau.

**7.1.8 Contrôle qualité et tests :** Tout au long du processus de fabrication, des contrôles qualité sont effectués pour garantir que les cellules solaires répondent aux normes et spécifications requises. Des tests de performance sont également effectués pour vérifier l'efficacité et la fiabilité des panneaux solaires.

En résumé, le processus de fabrication des cellules solaires photovoltaïques comprend plusieurs étapes, allant de la préparation des matériaux de base à la production de panneaux solaires finis, impliquant des processus de purification, de dopage, d'assemblage et de contrôle qualité pour assurer des produits finaux de haute qualité et performants.

## **8 Évaluation de l'efficacité et des performances des technologies**

### ***8.1 Méthodes d'évaluation de l'efficacité des cellules solaires.***

L'évaluation de l'efficacité des cellules solaires est essentielle pour mesurer leurs performances et identifier les domaines

d'amélioration. Voici quelques-unes des méthodes couramment utilisées pour évaluer l'efficacité des cellules solaires :

**A : Rendement de conversion énergétique :** Cette méthode mesure la capacité d'une cellule solaire à convertir la lumière solaire en électricité. Le rendement est calculé en comparant la puissance électrique produite par la cellule solaire à la puissance lumineuse incidente.

**B : Courbe de caractéristique I-V :** Cette méthode consiste à mesurer la courbe de tension-courant (I-V) d'une cellule solaire sous différentes conditions d'éclairement et de température. Cette courbe fournit des informations sur la puissance maximale de la cellule, son courant de court-circuit, sa tension de circuit ouvert, et son rendement de conversion.

- **Spectrophotométrie UV-Vis :** Cette méthode mesure la transmission et l'absorption de la lumière à différentes longueurs d'onde pour évaluer l'efficacité de la conversion de la lumière par la cellule solaire.

- **Analyse de la distribution spectrale de la réponse en courant (EQE) :** Cette méthode mesure la réponse en courant de la cellule solaire à différentes longueurs d'onde de la lumière incidente pour évaluer son efficacité dans la conversion de différentes parties du spectre solaire.

- **Analyse de la stabilité à long terme :** Cette méthode consiste à évaluer la stabilité des performances d'une cellule solaire sur une période prolongée, en mesurant régulièrement ses caractéristiques électriques sous des conditions d'exposition au soleil et de température variées.

- **Mesure du remplissage du facteur (FF) :** Le facteur de remplissage mesure l'efficacité de remplissage des porteurs de

charge dans la cellule solaire. Une valeur élevée de FF indique une meilleure efficacité de conversion.

• **Tests de résistance aux conditions environnementales** : Ces tests évaluent la capacité d'une cellule solaire à maintenir ses performances dans des conditions environnementales extrêmes telles que l'exposition aux UV, à l'humidité, aux températures élevées ou basses, et aux chocs thermiques.

En utilisant ces méthodes d'évaluation, les chercheurs et les fabricants peuvent quantifier et analyser les performances des cellules solaires, ce qui permet de guider le développement de nouvelles technologies et d'améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques.

## **8.2 Analyse comparative des performances des différentes technologies.**

L'analyse comparative des performances des différentes technologies de cellules solaires est essentielle pour comprendre les avantages et les inconvénients de chaque approche. Voici quelques points à considérer lors de cette analyse :

**A : Rendement** : Le rendement de conversion énergétique est l'un des principaux indicateurs de performance. Il mesure la capacité d'une cellule solaire à convertir la lumière solaire en électricité. Les technologies les plus performantes ont généralement un rendement plus élevé.

**B : Coût** : Le coût de fabrication des cellules solaires est un facteur important à prendre en compte. Certaines technologies peuvent être moins chères à produire, mais peuvent avoir un rendement légèrement inférieur. Une analyse coût-efficacité permet de déterminer quelle technologie offre le meilleur rapport qualité-prix.

• **Durabilité** : La durabilité d'une technologie de cellule solaire est importante pour assurer une performance à long terme. Certains matériaux peuvent être plus sensibles à la dégradation due aux conditions environnementales, tandis que d'autres peuvent offrir une meilleure résistance à la dégradation.

• **Stabilité à long terme** : La stabilité des performances des cellules solaires au fil du temps est cruciale pour garantir un rendement constant sur toute la durée de vie du système. Les technologies qui conservent leur efficacité pendant de nombreuses années sont préférables.

• **Adaptabilité** : Certaines technologies peuvent être mieux adaptées à des applications spécifiques en raison de leurs caractéristiques intrinsèques. Par exemple, les cellules solaires à couche mince peuvent être plus légères et flexibles, ce qui les rend adaptées à des applications telles que les toitures solaires intégrées.

• **Efficacité dans des conditions variables** : Les performances des cellules solaires peuvent varier en fonction des conditions environnementales telles que l'ensoleillement, la température et l'angle d'incidence de la lumière solaire. Certaines technologies peuvent être plus efficaces que d'autres dans des conditions variables.

• **Compatibilité avec d'autres technologies** : La compatibilité avec d'autres composants du système photovoltaïque, tels que les onduleurs et les systèmes de stockage d'énergie, est également un aspect important à considérer dans l'analyse comparative des performances.

En effectuant une analyse comparative des performances des différentes technologies de cellules solaires en fonction de ces critères, il est possible de déterminer quelle technologie est la



mieux adaptée à des applications spécifiques et de guider les décisions en matière de développement et de déploiement de systèmes solaires.

## ***Chapitre II : Applications actuelles et futures des cellules solaires***

## **Chapitre II : Applications actuelles et futures des cellules solaires**

### **1 introduction**

Les cellules solaires, également appelées cellules photovoltaïques, sont des dispositifs qui convertissent la lumière du soleil en électricité, Elles sont constituées de matériaux semi-conducteurs, tels que le silicium, qui absorbent les photons de la lumière du soleil et libèrent des électrons, Ces électrons peuvent ensuite être utilisés pour produire un courant électrique.

### **2 Utilisations domestiques des cellules solaires**

#### ***2.1 Applications de l'énergie solaire dans les foyers et les bâtiments.***

L'énergie solaire est de plus en plus utilisée dans les foyers et les bâtiments pour diverses applications, offrant de nombreux avantages en termes de réduction des coûts énergétiques, de durabilité et de réduction de l'empreinte carbone. Voici quelques-unes des principales applications de l'énergie solaire dans les foyers et les bâtiments :

**2.1.1 Production d'électricité :** Les panneaux solaires photovoltaïques installés sur les toits ou les terrains adjacents captent la lumière du soleil et la convertissent en électricité. Cette électricité peut être utilisée pour alimenter les appareils électroménagers, l'éclairage, les systèmes de chauffage et de climatisation, ainsi que tous les autres équipements électriques dans la maison ou le bâtiment.

**2.1.2 Chauffage de l'eau :** Les systèmes solaires thermiques peuvent être utilisés pour chauffer l'eau sanitaire pour la douche, les robinets et les systèmes de chauffage radiant. Les capteurs

solaires thermiques absorbent la chaleur du soleil et la transfèrent à un fluide caloporteur qui circule ensuite dans un système de stockage d'eau.

**2.1.3 Éclairage extérieur :** Les lampes solaires sont équipées de panneaux solaires intégrés qui chargent des batteries pendant la journée et fournissent de l'éclairage la nuit. Elles sont idéales pour l'éclairage des jardins, des allées, des patios et d'autres espaces extérieurs.

**2.1.4 Ventilation solaire :** Les systèmes de ventilation solaire utilisent l'énergie solaire pour faire fonctionner des ventilateurs qui expulsent l'air chaud et humide des greniers, des serres ou d'autres espaces clos, ce qui permet de maintenir une température confortable et d'améliorer la qualité de l'air intérieur.

**2.1.5 Intégration architecturale :** Les panneaux solaires peuvent être intégrés dans la conception architecturale des bâtiments, par exemple en tant qu'éléments de façade, de toiture ou de garde-corps. Cette intégration permet de maximiser l'utilisation de l'énergie solaire tout en ajoutant une esthétique moderne et durable aux structures.

**2.1.6 Systèmes de stockage d'énergie :** En combinaison avec des systèmes de stockage d'énergie tels que des batteries domestiques, l'énergie solaire peut être stockée pour une utilisation ultérieure, ce qui permet de réduire la dépendance au réseau électrique et de fournir une alimentation de secours en cas de coupure de courant.

Ces applications démontrent la polyvalence et les avantages de l'énergie solaire dans les foyers et les bâtiments, contribuant à une transition vers une énergie plus propre et durable.

## ***2.2 :Avantages et défis des installations solaires domestiques.***

Les installations solaires domestiques offrent de nombreux avantages, mais elles sont également confrontées à certains défis. Voici une liste des principaux avantages et défis associés aux installations solaires domestiques :

### **2.2.1 Avantages :**

**Économies à long terme :** Une fois installés, les systèmes solaires peuvent réduire considérablement, voire éliminer, les factures d'électricité à long terme, ce qui permet aux propriétaires d'économiser de l'argent sur leurs coûts énergétiques.

**Énergie renouvelable :** L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable et propre, ce qui contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à atténuer le changement climatique.

**Indépendance énergétique :** Les systèmes solaires permettent aux propriétaires de devenir plus indépendants sur le plan énergétique en produisant leur propre électricité, réduisant ainsi leur dépendance à l'égard des fournisseurs d'énergie traditionnels.

**Valorisation immobilière :** Les maisons équipées de systèmes solaires peuvent avoir une valeur plus élevée sur le marché immobilier en raison de leurs économies d'énergie et de leur durabilité, ce qui peut être un avantage lors de la revente.

**Incitations fiscales et subventions :** De nombreux gouvernements offrent des incitations fiscales, des crédits d'impôt et des subventions pour encourager l'installation de systèmes solaires domestiques, ce qui réduit les coûts initiaux pour les propriétaires.

### **2.2.2 Défis :**

**Coût initial élevé :** L'installation d'un système solaire peut être coûteuse, ce qui peut représenter un obstacle financier pour de nombreux propriétaires, même si les coûts ont considérablement diminué au fil des ans.

**Rentabilité à long terme :** Bien que les économies à long terme puissent être importantes, il peut falloir plusieurs années pour que les propriétaires récupèrent leur investissement initial, ce qui nécessite un engagement financier à long terme.

**Emplacement et orientation :** L'efficacité d'un système solaire dépend de facteurs tels que l'emplacement de la maison, l'orientation des panneaux solaires par rapport au soleil et la présence d'ombres ou d'obstacles qui peuvent réduire la production d'énergie.

**Maintenance et durabilité :** Les systèmes solaires nécessitent peu d'entretien, mais ils doivent être nettoyés régulièrement pour maintenir leur efficacité. De plus, les composants peuvent nécessiter des réparations ou un remplacement au fil du temps.

**Dépendance aux conditions météorologiques :** La production d'énergie solaire est affectée par les conditions météorologiques, notamment le temps nuageux, la pluie et la neige, ce qui peut entraîner une variation de la production d'électricité.

Malgré ces défis, les avantages des installations solaires domestiques l'emportent souvent, surtout à mesure que les technologies solaires continuent de s'améliorer et que les coûts diminuent.

### *3 Applications industrielles des cellules solaires*

#### *3.1 Utilisation de l'énergie solaire dans divers secteurs industriels.*

L'énergie solaire est de plus en plus utilisée dans divers secteurs industriels pour répondre aux besoins énergétiques, réduire les coûts et promouvoir la durabilité. Voici quelques-uns des principaux secteurs industriels où l'énergie solaire est utilisée :

- **Agriculture** : L'énergie solaire est utilisée dans l'agriculture pour alimenter les pompes à eau, les systèmes d'irrigation et les serres. Les pompes solaires permettent d'extraire l'eau des puits ou des réservoirs pour l'irrigation des cultures, ce qui réduit la dépendance aux combustibles fossiles et les coûts associés.

- **Fabrication** : Les installations de fabrication utilisent de grandes quantités d'électricité, et l'énergie solaire peut être utilisée pour alimenter les opérations de production, réduisant ainsi les coûts énergétiques et l'empreinte carbone de l'industrie manufacturière.

- **Construction** : Dans le secteur de la construction, l'énergie solaire est utilisée pour alimenter les équipements électriques sur les chantiers de construction, ainsi que pour fournir de l'électricité aux bâtiments une fois qu'ils sont terminés. Les panneaux solaires peuvent être intégrés dans les toits, les façades et d'autres éléments structurels des bâtiments pour fournir une source d'énergie renouvelable et réduire les coûts énergétiques.

- **Technologie de l'information et des communications (TIC)** : Les centres de données et les installations de

télécommunications utilisent de grandes quantités d'électricité pour alimenter les équipements informatiques et les réseaux de communication. L'énergie solaire peut être utilisée pour alimenter ces installations, réduisant ainsi les coûts énergétiques et l'empreinte carbone de l'industrie des TIC.

- **Transport** : Bien que l'utilisation directe de l'énergie solaire pour alimenter les véhicules soit limitée, l'énergie solaire est utilisée dans le transport pour alimenter les systèmes de signalisation et d'éclairage des routes, les bornes de recharge pour véhicules électriques, ainsi que les systèmes de transport en commun électrifiés.

- **Industrie pétrolière et gazière** : Dans l'industrie pétrolière et gazière, l'énergie solaire est utilisée pour alimenter les installations de forage, de pompage et de traitement, réduisant ainsi la dépendance aux générateurs diesel et aux autres sources d'énergie non renouvelables.

- **Industrie minière** : L'industrie minière utilise de grandes quantités d'énergie pour les opérations d'extraction, de traitement et de transport. L'énergie solaire peut être utilisée pour alimenter les équipements électriques sur les sites miniers, réduisant ainsi les coûts énergétiques et l'empreinte carbone de l'industrie minière.

Dans tous ces secteurs, l'utilisation de l'énergie solaire contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre, à atténuer le changement climatique et à promouvoir la durabilité environnementale tout en offrant une source d'énergie propre et renouvelable.

### ***3.2 Impact de l'énergie solaire sur l'efficacité et la durabilité des industries.***



L'intégration de l'énergie solaire dans divers secteurs industriels peut avoir un impact significatif sur leur efficacité opérationnelle et leur durabilité. Voici quelques-uns des principaux impacts de l'énergie solaire sur les industries :

**Réduction des coûts énergétiques :** L'utilisation de l'énergie solaire permet aux industries de réduire leurs coûts énergétiques à long terme en produisant leur propre électricité à partir d'une source d'énergie gratuite et renouvelable. Cela peut contribuer à améliorer la rentabilité des entreprises et à réduire leur dépendance aux fournisseurs d'énergie traditionnels, dont les coûts peuvent être volatils.

**Amélioration de la stabilité des coûts :** En utilisant l'énergie solaire pour alimenter une partie ou la totalité de leurs opérations, les industries peuvent mieux contrôler leurs coûts énergétiques, car l'énergie solaire est une ressource gratuite et prévisible. Cela peut réduire leur vulnérabilité aux fluctuations des prix de l'énergie sur le marché.

**Réduction des émissions de gaz à effet de serre :** L'énergie solaire est une source d'énergie propre et renouvelable qui ne produit pas de gaz à effet de serre lorsqu'elle est générée. En utilisant l'énergie solaire pour remplacer les sources d'énergie fossile plus polluantes, les industries peuvent réduire leurs émissions de CO<sub>2</sub> et leur empreinte carbone, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique.

**Renforcement de la durabilité :** L'intégration de l'énergie solaire dans les industries renforce leur durabilité environnementale en réduisant leur empreinte écologique et en minimisant leur impact sur les ressources naturelles. Les installations solaires peuvent être conçues pour minimiser leur empreinte au sol et préserver les écosystèmes locaux.

**Résilience aux pannes de réseau :** En utilisant l'énergie solaire avec des systèmes de stockage d'énergie, les industries peuvent accroître leur résilience aux pannes de réseau et aux coupures de courant. Les systèmes solaires avec stockage peuvent fournir une alimentation de secours fiable en cas d'urgence, assurant ainsi la continuité des opérations critiques.

**Image de marque et responsabilité sociale :** L'adoption de l'énergie solaire peut améliorer l'image de marque des industries en démontrant leur engagement envers la durabilité environnementale et la responsabilité sociale. Cela peut être particulièrement important pour les industries soucieuses de leur réputation et de leur relation avec les parties prenantes.

En résumé, l'énergie solaire peut avoir un impact positif sur l'efficacité opérationnelle et la durabilité des industries en réduisant les coûts énergétiques, en réduisant les émissions de gaz à effet de serre, en renforçant la résilience aux pannes de réseau et en améliorant leur image de marque et leur responsabilité sociale.

#### ***4 Technologies futures pour le développement des cellules solaires***

##### ***4.1 Innovations technologiques dans le domaine des cellules solaires.***

Dans le domaine des cellules solaires, des innovations technologiques sont continuellement développées pour améliorer l'efficacité, la durabilité et la rentabilité des installations solaires. Voici quelques-unes des principales innovations technologiques récentes dans ce domaine :

- **Cellules solaires à pérovskite :** Les cellules solaires à pérovskite ont émergé comme une alternative prometteuse aux cellules solaires traditionnelles en silicium. Elles sont fabriquées

à partir de matériaux peu coûteux et peuvent être produites avec des méthodes de fabrication moins énergivores. Les cellules à pérovskite ont le potentiel d'atteindre des efficacités élevées et peuvent être flexibles, légères et transparentes, ce qui ouvre de nouvelles possibilités d'intégration dans diverses applications.

- **Cellules solaires organiques** : Les cellules solaires organiques utilisent des matériaux organiques ou polymères pour convertir la lumière solaire en électricité. Bien qu'elles aient historiquement des rendements moins élevés que les cellules solaires inorganiques, des progrès significatifs ont été réalisés pour améliorer leur efficacité et leur stabilité. Les cellules solaires organiques peuvent être produites à faible coût et sont flexibles, ce qui les rend adaptées à une variété d'applications.

- **Cellules solaires bifaciales** : Les cellules solaires bifaciales captent la lumière solaire des deux côtés du module, ce qui augmente leur rendement global. En plus de capter la lumière directe du soleil, elles peuvent également utiliser la lumière réfléchie par des surfaces réfléchissantes telles que le sol ou les bâtiments environnants. Cette technologie améliore l'efficacité des installations solaires, en particulier dans les environnements avec une réflexion élevée.

- **Optimisation des matériaux** : Des recherches sont en cours pour développer de nouveaux matériaux avec des propriétés améliorées pour les cellules solaires, notamment des matériaux plus efficaces pour la conversion de la lumière solaire en électricité, ainsi que des matériaux plus durables et abordables pour les composants des cellules solaires.

- **Nanotechnologie** : La nanotechnologie est utilisée pour améliorer les performances des cellules solaires en manipulant la structure et les propriétés des matériaux à l'échelle nanométrique. Par exemple, l'utilisation de nanofils, de

nanoparticules et d'autres nanostructures peut améliorer l'absorption de la lumière, la séparation des charges et la conductivité des cellules solaires.

• **Intégration avec le stockage d'énergie** : L'intégration des systèmes de stockage d'énergie, tels que les batteries, avec les installations solaires permet de stocker l'électricité produite pendant les périodes ensoleillées pour une utilisation ultérieure lorsque le soleil ne brille pas. Cela améliore la fiabilité et l'efficacité des installations solaires, en permettant une utilisation plus flexible de l'électricité solaire.

Ces innovations technologiques contribuent à faire avancer l'industrie solaire en rendant l'énergie solaire plus compétitive par rapport aux sources d'énergie conventionnelles et en ouvrant de nouvelles possibilités pour son utilisation dans diverses applications.

#### ***4.2 Recherches en cours et perspectives pour les futures applications solaires.***

Les recherches en cours dans le domaine des applications solaires sont axées sur plusieurs aspects visant à améliorer l'efficacité, la durabilité, la rentabilité et l'intégration de l'énergie solaire dans divers secteurs. Voici quelques domaines de recherche et les perspectives pour les futures applications solaires :

**Efficacité des cellules solaires** : Les chercheurs continuent de travailler sur le développement de cellules solaires plus efficaces, capables de convertir une plus grande partie du spectre solaire en électricité. Des avancées sont réalisées dans les domaines des cellules solaires à pérovskite, des cellules multi-jonctions, de la nanotechnologie et de la photonique pour améliorer les rendements et réduire les coûts.

**Stockage de l'énergie :** Les recherches se concentrent sur le développement de technologies de stockage d'énergie solaire plus efficaces, abordables et durables. Des progrès sont réalisés dans les batteries lithium-ion, les batteries à flux redox, les supercondensateurs et d'autres solutions de stockage pour permettre une utilisation plus flexible de l'énergie solaire.

**Intégration dans les réseaux électriques :** L'intégration de l'énergie solaire dans les réseaux électriques est un domaine de recherche important pour assurer la stabilité et la fiabilité des réseaux électriques. Les chercheurs travaillent sur des solutions de gestion de l'énergie, des technologies de communication et des modèles de prévision pour faciliter l'intégration de l'énergie solaire à grande échelle.

**Nouvelles applications et matériaux :** Les chercheurs explorent de nouvelles applications de l'énergie solaire dans des domaines tels que l'agriculture, la construction, les transports et l'électronique portable. De nouveaux matériaux et technologies, tels que les cellules solaires transparentes, flexibles et colorées, ouvrent de nouvelles possibilités pour l'intégration de l'énergie solaire dans diverses applications.

**Énergie solaire spatiale :** La recherche sur l'énergie solaire spatiale vise à capturer l'énergie solaire directement dans l'espace à l'aide de panneaux solaires orbitaux et à la transmettre sous forme de micro-ondes ou de laser vers la Terre. Bien que cette technologie soit encore au stade de la recherche et du développement, elle pourrait offrir une source d'énergie solaire inépuisable et constante, indépendante des conditions météorologiques sur Terre.

**Durabilité et recyclage :** Avec l'augmentation de la production et de l'installation de panneaux solaires, la durabilité et le recyclage des composants solaires deviennent des

préoccupations importantes, Les recherches portent sur le développement de matériaux solaires plus durables, ainsi que sur des méthodes efficaces de recyclage des panneaux solaires en fin de vie pour réduire leur impact environnemental.

Dans l'ensemble, les perspectives pour les futures applications solaires sont prometteuses, avec un accent croissant sur l'efficacité, la durabilité, l'intégration et l'expansion de l'utilisation de l'énergie solaire pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux de manière propre et renouvelable.

***Chapitre III* : Défis et innovations  
dans le domaine de l'énergie solaire**

## **Chapitre III : Défis et innovations dans le domaine de l'énergie solaire**

### **1 Introduction**

L'énergie solaire, puisant sa force dans l'astre qui rythme nos journées, s'impose comme une solution prometteuse pour répondre aux enjeux environnementaux majeurs de notre siècle. Face à l'urgence climatique et à l'épuisement des ressources fossiles, cette source d'énergie renouvelable se présente comme une alternative durable et infinie, promettant de réduire notre empreinte carbone et de bâtir un avenir plus vert.

Cependant, malgré son immense potentiel, l'énergie solaire n'est pas sans défis. Son développement à grande échelle se heurte à des obstacles qu'il est crucial de surmonter pour en exploiter pleinement le potentiel. C'est dans ce contexte que la recherche et l'innovation jouent un rôle crucial, en s'attaquant à ces défis et en ouvrant la voie à des solutions ingénieuses pour un avenir solaire radieux.

### **2 Défis de l'industrie solaire**

#### ***2.1 Principaux défis rencontrés par l'industrie solaire :***

L'industrie solaire est confrontée à plusieurs défis, malgré son importante croissance et son potentiel pour fournir une source d'énergie propre et renouvelable. Voici quelques-uns des principaux défis rencontrés par l'industrie solaire :

**2.1.1 Coût initial élevé :** Bien que les coûts des technologies solaires aient considérablement diminué au fil des ans, le coût initial d'installation reste souvent élevé. Cela peut constituer un



obstacle pour de nombreux consommateurs, en particulier dans les régions où les incitations financières et les politiques de soutien ne sont pas suffisamment développées.

### **2.1.2 Dépendance aux incitations gouvernementales :**

L'industrie solaire dépend souvent des incitations gouvernementales telles que les crédits d'impôt, les subventions et les tarifs d'achat pour stimuler la demande et encourager l'investissement dans les installations solaires. Les changements dans les politiques gouvernementales peuvent avoir un impact significatif sur le marché solaire, ce qui rend l'industrie vulnérable aux fluctuations politiques.

### **2.1.3 Stockage de l'énergie :**

L'intermittence de la disponibilité du soleil pose un défi majeur pour l'industrie solaire, car l'énergie solaire ne peut être produite que pendant la journée et est soumise aux variations météorologiques. Le développement de solutions de stockage d'énergie efficaces et abordables est essentiel pour garantir une alimentation électrique continue et stable à partir de sources solaires.

### **2.1.4 Intégration dans les réseaux électriques :**

L'intégration de l'énergie solaire dans les réseaux électriques existants présente des défis techniques, notamment en ce qui concerne la gestion de la variabilité de la production solaire, la stabilité du réseau et la coordination avec d'autres sources d'énergie. Des investissements dans les infrastructures de réseau et les technologies de gestion de l'énergie sont nécessaires pour faciliter une intégration harmonieuse de l'énergie solaire à grande échelle.

### **2.1.5 Durabilité et recyclage :**

Alors que l'industrie solaire se développe, la durabilité des matériaux utilisés dans les panneaux solaires et leur recyclage en fin de vie deviennent des préoccupations croissantes. Des efforts sont nécessaires pour

développer des processus de fabrication plus durables, réduire l'utilisation de matériaux rares et toxiques, et mettre en place des systèmes de recyclage efficaces pour les panneaux solaires usagés.

**2.1.6 Concurrence avec les énergies conventionnelles :** Malgré ses nombreux avantages, l'énergie solaire doit encore faire face à une concurrence féroce avec les sources d'énergie conventionnelles telles que le charbon, le gaz naturel et le pétrole. Les subventions et les politiques de soutien continuent souvent à favoriser les énergies fossiles, ce qui rend plus difficile la compétitivité de l'énergie solaire sur le marché.

En surmontant ces défis, l'industrie solaire peut jouer un rôle de plus en plus important dans la transition vers une économie basée sur les énergies propres et renouvelables, contribuant ainsi à atténuer le changement climatique et à assurer un avenir énergétique durable.

## **2.2 Solutions proposées pour surmonter ces défis.**

Pour surmonter les défis rencontrés par l'industrie solaire, diverses solutions peuvent être envisagées. Voici quelques-unes des solutions proposées :

**2.2.1 R&D et innovation :** Investir dans la recherche et le développement de nouvelles technologies solaires, telles que les cellules solaires à pérovskite, les cellules solaires organiques et les cellules solaires bifaciales, peut contribuer à améliorer l'efficacité, la durabilité et la rentabilité des installations solaires.

**2.2.2 Réduction des coûts :** Continuer à réduire les coûts de fabrication, d'installation et de maintenance des installations solaires est essentiel pour rendre l'énergie solaire plus compétitive par rapport aux sources d'énergie conventionnelles. Cela peut être réalisé grâce à des avancées technologiques, à

l'automatisation des processus de fabrication et à l'optimisation des chaînes d'approvisionnement.

**2.2.3 Politiques de soutien :** Mettre en place des politiques de soutien stables et favorables à l'énergie solaire, telles que des incitations fiscales, des tarifs d'achat garantis, des objectifs de déploiement solaire et des normes de performance énergétique, peut stimuler l'investissement dans les installations solaires et favoriser la croissance de l'industrie.

**2.2.4 Développement du stockage de l'énergie :** Accélérer le développement et le déploiement de solutions de stockage d'énergie, telles que les batteries lithium-ion, les systèmes de stockage d'hydrogène et les systèmes de stockage thermique, peut atténuer les défis liés à l'intermittence de la disponibilité du soleil et garantir une alimentation électrique continue à partir de sources solaires.

**2.2.5 Modernisation des réseaux électriques :** Investir dans la modernisation et l'extension des réseaux électriques pour faciliter une intégration harmonieuse de l'énergie solaire à grande échelle est crucial. Cela peut inclure l'adoption de technologies de gestion de l'énergie avancées, la mise en œuvre de mécanismes de tarification appropriés et le renforcement des infrastructures de transmission et de distribution.

**2.2.6 Éducation et sensibilisation :** Sensibiliser le public, les décideurs politiques et les acteurs de l'industrie aux avantages de l'énergie solaire et à son rôle dans la transition énergétique est important pour favoriser son acceptation et son adoption. Cela peut être réalisé grâce à des campagnes d'information, des programmes éducatifs et des initiatives de sensibilisation communautaire.

**2.2.7 Collaboration et partenariats :** Encourager la collaboration entre les gouvernements, l'industrie, les universités, les

organisations de recherche et la société civile peut favoriser l'innovation, le partage des meilleures pratiques et la résolution collective des défis liés à l'énergie solaire.

En mettant en œuvre ces solutions, l'industrie solaire peut surmonter les défis actuels et continuer à jouer un rôle croissant dans la transition vers un avenir énergétique plus propre, plus durable et plus résilient.

### ***3 Innovations récentes dans l'énergie solaire***

#### ***3.1 Nouvelles technologies et avancées dans le domaine de l'énergie solaire :***

De nombreuses nouvelles technologies et avancées continuent de façonner le domaine de l'énergie solaire, améliorant son efficacité, sa durabilité et son potentiel d'application. Voici quelques-unes des nouvelles technologies et avancées récentes dans le domaine de l'énergie solaire :

**3.1.1 Cellules solaires à pérovskite :** Les cellules solaires à pérovskite ont attiré une attention considérable en raison de leur potentiel à atteindre des rendements élevés à moindre coût. Ces cellules utilisent des matériaux peu coûteux et peuvent être produites avec des méthodes de fabrication moins énergivores, offrant ainsi une alternative prometteuse aux cellules solaires traditionnelles en silicium.

**3.1.2 Cellules solaires organiques :** Les cellules solaires organiques utilisent des matériaux organiques ou polymères pour convertir la lumière solaire en électricité. Des avancées récentes dans ce domaine ont conduit à des améliorations significatives de l'efficacité et de la stabilité des cellules solaires organiques, les rendant plus compétitives sur le marché.

**3.1.3 Cellules solaires bifaciales :** Les cellules solaires bifaciales captent la lumière solaire des deux côtés du module, ce qui augmente leur rendement global. Ces cellules offrent une efficacité supérieure dans les environnements avec une réflexion élevée, tels que les surfaces enneigées ou les toits réfléchissants.

**3.1.4 Intégration avec le stockage d'énergie :** L'intégration de l'énergie solaire avec des systèmes de stockage d'énergie, tels que les batteries lithium-ion et les systèmes de stockage d'hydrogène, offre la possibilité de stocker l'électricité solaire pour une utilisation ultérieure, améliorant ainsi la fiabilité et la flexibilité des installations solaires.

**3.1.5 Nouveaux matériaux et revêtements :** Des progrès sont réalisés dans le développement de nouveaux matériaux et revêtements pour les panneaux solaires, notamment des matériaux plus efficaces pour la capture de la lumière solaire, des revêtements anti-réflexion et des matériaux durables et recyclables.

**3.1.6 Systèmes de suivi solaire :** Les systèmes de suivi solaire, qui ajustent automatiquement l'angle et l'orientation des panneaux solaires pour suivre la trajectoire du soleil tout au long de la journée, augmentent l'efficacité des installations solaires en optimisant la capture de la lumière solaire.

**3.1.7 Énergie solaire spatiale :** Bien que toujours au stade de la recherche et du développement, l'énergie solaire spatiale est une technologie prometteuse qui vise à capturer l'énergie solaire directement dans l'espace à l'aide de panneaux solaires orbitaux et à la transmettre sous forme de micro-ondes ou de laser vers la Terre.

Ces nouvelles technologies et avancées continuent de propulser l'industrie solaire vers l'avant, offrant de nouvelles possibilités

pour son utilisation dans diverses applications et contribuant à accélérer la transition vers une économie basée sur les énergies propres et renouvelables.

### ***3.2 Impact des innovations sur l'industrie solaire :***

Les innovations dans le domaine de l'énergie solaire ont un impact significatif sur l'industrie solaire à plusieurs niveaux, en influençant son efficacité, sa compétitivité, sa durabilité et sa portée d'application. Voici quelques-uns des principaux impacts des innovations sur l'industrie solaire :

**3.2.1 Amélioration de l'efficacité :** Les innovations telles que les cellules solaires à pérovskite, les cellules solaires bifaciales et les technologies de suivi solaire permettent d'augmenter l'efficacité de la capture de la lumière solaire et de la conversion en électricité. Cela se traduit par des installations solaires plus productives, capables de générer plus d'énergie à partir d'une surface donnée.

**3.2.2 Réduction des coûts :** Les avancées technologiques, les processus de fabrication plus efficaces et l'échelle de production croissante ont contribué à réduire considérablement les coûts des installations solaires au fil du temps. Cela rend l'énergie solaire de plus en plus compétitive par rapport aux sources d'énergie conventionnelles, stimulant ainsi la demande et l'adoption de l'énergie solaire.

**3.2.3 Augmentation de la durabilité :** Les innovations dans les matériaux, les processus de fabrication et les technologies de recyclage ont amélioré la durabilité des installations solaires, réduisant leur impact environnemental tout au long de leur cycle de vie. Cela renforce la position de l'énergie solaire en tant que solution énergétique propre et renouvelable.

**3.2.4 Élargissement des applications :** Les nouvelles technologies solaires ouvrent de nouvelles possibilités pour l'utilisation de l'énergie solaire dans diverses applications, telles que les bâtiments intelligents, les transports électriques, l'électrification rurale et les applications spatiales. Cela élargit le marché potentiel pour l'industrie solaire et stimule l'innovation continue.

**3.2.5 Renforcement de la résilience énergétique :** L'intégration de l'énergie solaire avec des systèmes de stockage d'énergie, des micro-réseaux et d'autres technologies de gestion de l'énergie renforce la résilience énergétique des installations solaires, les rendant plus robustes face aux pannes de réseau et aux conditions météorologiques extrêmes.

**3.2.6 Développement de l'industrie :** Les innovations dans l'industrie solaire stimulent la croissance économique et la création d'emplois dans le secteur des énergies renouvelables. L'industrie solaire devient un moteur de l'innovation et de la compétitivité, attirant des investissements et contribuant au développement économique local et mondial.

En résumé, les innovations dans le domaine de l'énergie solaire ont un impact positif et transformationnel sur l'industrie solaire, la rendant plus efficace, plus compétitive, plus durable et plus adaptable à une gamme croissante d'applications. Ces innovations jouent un rôle crucial dans la transition vers un avenir énergétique propre, renouvelable et durable.

## **4 Avenir de l'énergie solaire**

### **4.1 *Prévisions et tendances pour l'avenir de l'énergie solaire :***

Les prévisions et tendances pour l'avenir de l'énergie solaire sont prometteuses, avec une croissance continue prévue dans le

monde entier. Voici quelques-unes des principales prévisions et tendances pour l'avenir de l'énergie solaire :

**4.1.1 Croissance exponentielle :** On prévoit une croissance exponentielle de la capacité solaire installée dans les prochaines décennies, alimentée par une combinaison de facteurs tels que la baisse des coûts, les politiques de soutien, les avancées technologiques et la demande croissante d'énergie propre.

**4.1.2 Parité réseau :** De plus en plus de régions atteindront la parité réseau, où le coût de l'énergie solaire deviendra équivalent ou inférieur au coût de l'électricité provenant de sources conventionnelles telles que le charbon et le gaz naturel. Cela rendra l'énergie solaire plus compétitive et favorisera son adoption à grande échelle.

**4.1.3 Intégration généralisée :** L'énergie solaire sera de plus en plus intégrée dans les réseaux électriques existants, grâce à des avancées dans les technologies de stockage d'énergie, la gestion de l'énergie et les infrastructures de réseau. L'intégration de l'énergie solaire aidera à assurer la stabilité et la fiabilité des réseaux électriques tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

**4.1.4 Diversification des applications :** L'utilisation de l'énergie solaire se diversifiera au-delà de la production d'électricité, avec une utilisation accrue dans des applications telles que le chauffage et la climatisation solaires, la désalinisation de l'eau, la production d'hydrogène vert et l'électrification des transports.

**4.1.5 Innovations technologiques continues :** Les progrès dans les technologies solaires, y compris les cellules solaires à haut rendement, les matériaux innovants, les systèmes de stockage d'énergie et les solutions de gestion de l'énergie, continueront à stimuler l'efficacité et la rentabilité de l'énergie solaire.



**4.1.6 Adoption accrue dans les marchés émergents :** Les marchés émergents, en particulier dans les régions en développement, joueront un rôle de plus en plus important dans la croissance de l'énergie solaire. L'énergie solaire offre une solution accessible et rentable pour répondre aux besoins croissants en énergie dans ces régions, tout en contribuant à réduire la pauvreté énergétique et à promouvoir le développement durable.

**4.1.7 Transition vers l'énergie 100 % renouvelable :** L'énergie solaire jouera un rôle clé dans la transition mondiale vers un système énergétique 100 % renouvelable, en fournissant une source d'énergie abondante, propre et durable pour répondre aux besoins croissants en énergie tout en réduisant les émissions de carbone et en luttant contre le changement climatique.

En résumé, l'avenir de l'énergie solaire est prometteur, avec des prévisions de croissance continue, d'innovations technologiques et d'adoption généralisée à travers le monde. L'énergie solaire deviendra de plus en plus un pilier essentiel du mix énergétique mondial, contribuant à un avenir plus propre, plus durable et plus résilient.

## ***4.2 Rôle de l'énergie solaire dans la transition énergétique mondiale :***

Le rôle de l'énergie solaire dans la transition énergétique mondiale est crucial pour plusieurs raisons :

**4.2.1 Réduction des émissions de carbone :** L'énergie solaire est une source d'énergie propre et renouvelable qui ne produit pas de gaz à effet de serre lors de sa production. En remplaçant les sources d'énergie fossiles telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, l'énergie solaire contribue à réduire les émissions de carbone et à atténuer le changement climatique.

**4.2.2 Abondance et disponibilité :** Le soleil est une ressource abondante et largement disponible dans le monde entier. L'énergie solaire offre donc une solution énergétique durable pour répondre aux besoins croissants en énergie de manière propre et renouvelable, en particulier dans les régions en développement où l'accès à l'électricité est limité.

**4.2.3 Indépendance énergétique :** En exploitant l'énergie solaire, les pays peuvent réduire leur dépendance aux importations de combustibles fossiles, ce qui renforce leur sécurité énergétique et réduit leur exposition aux fluctuations des prix du pétrole et du gaz sur le marché mondial.

**4.2.4 Création d'emplois et stimulation économique :** L'industrie solaire crée des emplois locaux dans les domaines de la conception, de l'installation, de la fabrication et de la maintenance des installations solaires. En investissant dans l'énergie solaire, les pays peuvent stimuler leur économie, encourager l'innovation et promouvoir le développement industriel.

**4.2.5 Accès à l'énergie propre :** L'énergie solaire offre une solution abordable et accessible pour fournir de l'électricité dans les régions éloignées ou sous-électrifiées, où le raccordement au réseau électrique traditionnel peut être difficile ou coûteux. Cela contribue à réduire la pauvreté énergétique et à améliorer les conditions de vie des populations locales.

**4.2.6 Flexibilité et modularité :** Les installations solaires peuvent être déployées à différentes échelles, depuis de petits systèmes résidentiels jusqu'à de grandes centrales solaires, en fonction des besoins locaux en énergie. Cette flexibilité permet une intégration harmonieuse dans les réseaux électriques existants et une adaptation aux besoins spécifiques des communautés.

En combinant ces facteurs, l'énergie solaire joue un rôle central dans la transition énergétique mondiale vers un avenir plus propre, plus durable et plus résilient. En complément des autres sources d'énergie renouvelable et des mesures d'efficacité énergétique, l'énergie solaire offre une solution essentielle pour répondre aux défis environnementaux, économiques et sociaux auxquels le monde est confronté.

## **Conclusion General**

En conclusion, l'énergie solaire représente une ressource abondante, propre et renouvelable avec un potentiel énorme pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux tout en réduisant les émissions de carbone et en atténuant les impacts du changement climatique. Ce mémoire a exploré en détail les technologies des cellules solaires, les applications actuelles et futures de l'énergie solaire, ainsi que les défis et les innovations dans le domaine.

Nous avons constaté que les avancées technologiques, telles que les cellules solaires à pérovskite et les systèmes de stockage d'énergie, sont en train de transformer l'industrie solaire en rendant les installations plus efficaces, plus abordables et plus adaptables à une variété d'applications. De plus, l'intégration croissante de l'énergie solaire dans les réseaux électriques et les industries offre des opportunités de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et d'améliorer la durabilité environnementale.

Cependant, des défis persistent, notamment en ce qui concerne le coût initial élevé, le stockage de l'énergie, l'intégration aux réseaux électriques et la concurrence avec les énergies conventionnelles. Pour surmonter ces défis, il est crucial de poursuivre les efforts d'innovation, de renforcer les politiques de soutien à l'énergie solaire et de promouvoir une collaboration étroite entre les gouvernements, l'industrie et la société civile.

Enfin, l'énergie solaire jouera un rôle de plus en plus important dans la transition énergétique mondiale, en contribuant à un avenir plus propre, plus durable et plus résilient pour les générations futures. En investissant dans l'énergie solaire et en exploitant son potentiel maximal, nous pouvons créer un monde où l'électricité propre et abordable est accessible à tous, tout en préservant notre planète pour les générations à venir.

## **Bibliographie**

[1] :K.Touafek,"Etude d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique", mémoire de magister, école nationale polytechnique, Alger, 2005.

[2] :Mohammed Telidjane « Modélisation des panneaux photovoltaïques et adaptation de la cyclostationarité pour le diagnostic ». Thèse de Doctorat, Université de Jean Monnet SaintEtienne, 2017.

[3] :Laure-Anne Pessina, «< Rendement record pour des cellules solaires en silicium et pérovskite » [archive], sur EPFL, 11 juin 2018 (consulté le 12 juin 2018).

[4] :<< CORRECTING and REPLACING Phillips 66, South China University of Technology, and Solarmer Energy Set a World Record in Solar Power Conversion Efficiency » [archive], sur businesswire, 22 août 2012 (consulté le 10 December 2017).

[5] :DIB W.Née KAZI-TANI «<Modélisation Des Structures Photovoltaïques : Aspects Fondamentaux Et Appliqués » Thèse Doctorat. Tlemcen, 2010/2011.

[6] :<< White House installs solar-electric system - 1/22/2003 - ENN.com » [archive du 29 février 2004], 29 février 2004 (consulté le 8 avril 2017).

[7] :BorniAbdelhalim"Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire", Mémoire magistère Constantine, 2009.

[8] :BOUKHLIF Hamza, « Dimensionnement technique d'une installation photovoltaïque.

[9] :Le baromètre du photovoltaïque. Systèmes solaires no154, (2003).

[10] :IEC (2008). IEC 60904-3 (Ed. 2), Photovoltaic devices - Part 3: Measurement Principles for Terrestrial Photovoltaic (PV) Solar Devices with Reference Spectral Irradiance Data. Technical report.

[11] :CLAVERIE.A, «< Etat de l'art mondial de la technique photovoltaïque et politiques de promotion >>. Séminaire sur l'Electricité Photovoltaïque, Nice, 1994

[12] : Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07

[13] :ZERROUKI Zolikha & BEREKSI REGUIG Rym«< Dimensionnement d'un système Photovoltaïque autonome >>UNIVERSITÉ ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEN

[14] :<http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaique-autonome-1/fiche-techniquemodule-photovoltaique.php>.

[15] :Damien MAZILLE; Vincent BOITIER « Documentation pour l'utilisation du logiciel PVSyst V5.

[16] :S. Bensmail, «< Contribution à la modélisation Et à l'optimisation des systèmes photovoltaïques >>. Mémoire De Magister, Génie électrique, Université De A. Mira-Bejaia,

2012.

[17] :I. Tsuda, K. Kurokawa, K.Nozaki, «Annual simulation results of photovoltaic systemwith redox flow battery », solar Energy Materials and solar cells 35, pp 503-508, 1994.

[18] :MOSTAHSINE Smail, «Etude comparatif de panneaux solaires photovoltaïques àIfrane», Rapport de licence, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah 16 Jin 2015.

[19] :TRAHI Fatiha. << Application pour le dimensionnement d'une installationPhotovoltaïque pour l'alimentation du laboratoire de recherche LAMPA. »