

## I.1. Introduction

Le développement de l'exploitation des énergies renouvelables a connu une forte croissance ces dernières années. La production d'électricité par des sources d'énergie renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant les normes écologiques de l'énergie. Le caractère renouvelable d'une énergie dépend de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée.

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque(PV).

Dans ce chapitre nous allons présenter le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïque et ses performances ainsi le générateur solaire photovoltaïque et les différents associations pour avoir un panneau solaire.

## I.2. Rayonnement solaire

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre  $150 \cdot 10^6 \text{ Km}$ , la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante  $180 \cdot 10^6 \text{ GW}$ , c'est pour cela que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie non-renouvelables.

Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de  $220$  à  $10000 \text{ nm}$ , l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit [3] :

- 9 % dans la bande des ultraviolets ( $<$  à  $400 \text{ nm}$ ).
- 47 % dans la bande visible ( $400$  à  $800 \text{ nm}$ ).
- 44 % dans la bande des infrarouges ( $>$  à  $800 \text{ nm}$ ).

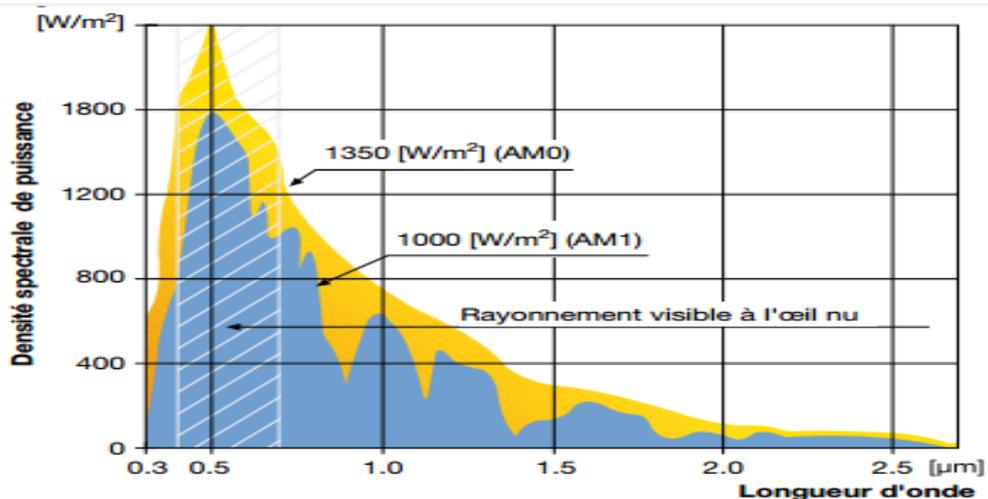


Fig. I.1 : Réponse spectrale d'une cellule PV

Au cours de ces dix dernières années ce spectre a été homologué par l'organisation internationale de standardisation (ISO 9845-1 :1992) et la société américaine de test et de matériaux (ASTM E 892-87 :1992) ont fixées le flux de standardisation Es à  $1000 \text{ W/m}^2$  [2].

Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur  $10\,000 \text{ W/m}^2$  crête dans les zones tempérées et jusqu'à  $14\,000 \text{ W/m}^2$  lorsque l'atmosphère est faiblement polluée.

### I.3. Energie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

Le mot "photovoltaïque" vient de la grecque, "Photo" qui signifie lumière et de "Voltaïque" qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la "lumière électricité" [2].

Un système photovoltaïque est destiné à satisfaire un besoin d'énergie électrique selon des conditions spécifiques d'exploitation. Il est généralement constitué d'un générateur photovoltaïque, d'un système de stockage, de source auxiliaire d'appoint (groupe diesel, aérogénérateur, réseau, etc.....), des systèmes d'interface (convertisseurs, réseau, etc...) d'un système de control et de commande (système de surveillance, armoires électriques, cartes électroniques...) et d'une utilisation courant un usage déterminé. Cet usage (éclairage, réfrigération, pompage, communication,...) est exploité dans divers secteurs (santé, éducation, agriculture, énergie...).

La topologie d'un système PV est déterminée selon d'une part la nature de l'utilisation (nombre de récepteurs, contrainte d'exploitation, sécurité énergétique,..) et d'autre part des considérations technico-économiques prenant en compte aussi bien le rendement énergétique que la taille de l'investissement.

La partie principale dans ces installations est le générateur photovoltaïque. Il est composé de divers modules formés par une association série-parallèles de cellules élémentaires convertissant l'énergie solaire (sous formes de rayonnement) en une énergie électrique. Une cellule peut produire  $1.5 \text{ W}$  pour un ensoleillement de  $100 \text{ W/m}^2$  avec une tension de  $0.6 \text{ V}$ . Un module de 36 cellules produit une puissance moyenne de  $40$  à  $50 \text{ W}$  et occupe une surface de  $0.5 \text{ m}^2$  environ. Le rendement énergétique moyen est de l'ordre de  $12$  à  $15\%$  est atteint pour une phase de recherche  $30\%$ .

La durée de vie d'un tel générateur est estimée à plus de 20ans [1].

#### I.4. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule [2].

L'absorption d'un photon par un semi-conducteur donne naissance à une paire d'électron trou lorsque son énergie est supérieure à celle de la largeur de la bande interdite du matériau. Le champ électrique interne à la jonction, entraîne alors le trou vers la région P et l'électron vers la région N. Par tapage du semi-conducteur de région de type P et de type N ; la cellule solaire est donc une jonction P-N avec des diverses parties représentées sur le schéma de la figure suivante [3] :

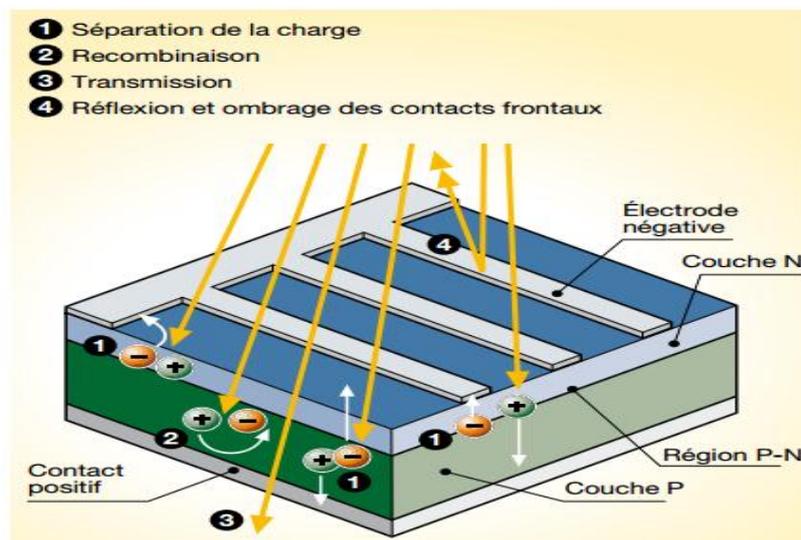


Fig. I.2 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Lorsqu'un photon vient frapper la zone de transition, il arrache un électron à l'atome de silicium qui va se déplacer du côté N, tandis que le « trou » ainsi créé par cet arrachement va se déplacer du côté P. Il apparaît ainsi aux bornes du dispositif, une différence de potentiel. Si on ferme la cellule sur un circuit extérieur, un courant va circuler. La cellule qui se comporte comme une pile sensible aux photons (c.à.d. à la lumière) s'appelle des photopiles.

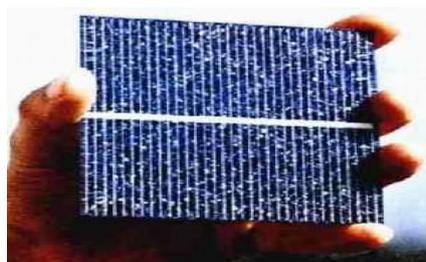


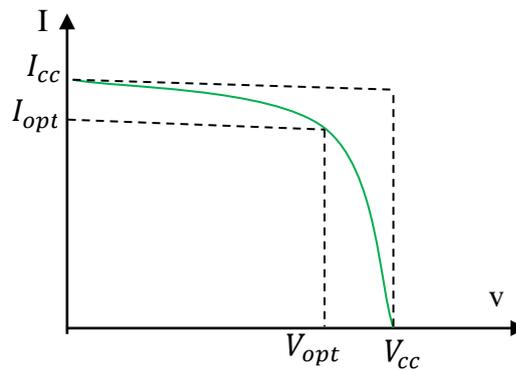
Fig. I.3 : Cellule photovoltaïque

L'inconvénient principal des photopiles reste la limitation de leur rendement. Il est de l'ordre de 12% pour une cellule de silicium monocristallin. Plusieurs phénomènes entrent en ligne de compte dans cette limitation du rendement, mais les deux principaux sont les suivantes :

- Non absorption des photons peu énergétiques (infrarouge).
- Utilisation partielle de l'énergie de photons très énergétiques (ultraviolet).

La part de cette énergie qui n'est pas employée est dissipée dans le matériau sous forme de chaleur.

Une cellule photovoltaïque représentée par sa caractéristique  $I_p = f(V)$  donnée sous la courbe illustrée dans figure suivante [5].



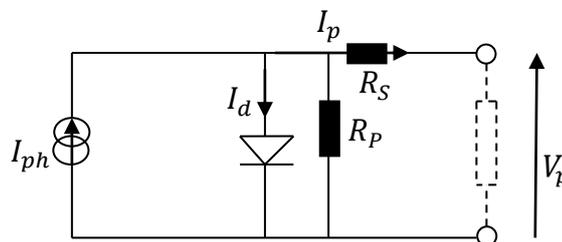
**Fig. I.4 : Caractéristique courant tension  
D'une cellule PV au silicium**

La caractéristique électrique d'une diode est régie par :

$$I_d = I_s (e^{\frac{V_p}{V_T}} - 1) \tag{I.1}$$

Le courant dans une cellule PV est donnée par :

$$I_p = I_{ph} - I_d = I_{PH} - I_s (e^{\frac{V_p}{V_T}} - 1)$$



**Fig. I.5 : Modèle équivalent d'une  
Cellule PV au silicium**

$I_p$  : Courant fournie par une cellule (A).

$I_{ph}$  : Photo courant (A).

$I_d$ : Courant de la diode (A).

$I_s$ : Courant inverse de la jonction PN.

$V_p$ : Tension aux bornes de la cellule (V).

$V_t = K.T/q$ : Potentielle thermique.

$q$ : Charge électrique élémentaire (C).

$K$ : Constante de Boltzmann,  $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ .

$T$ : Température en  $^\circ\text{K}$ .

## I.5. Technologies des cellules photovoltaïques [3] [2]

### I.5.1. La première technologie

Photovoltaïque recourt aux cellules de silicium monocristallin (d'efficacité est de 12 à 18 %, de durée de vie de 25 à 30 ans) ou Poly-cristallin (d'efficacité qui varie généralement de 13 à 18 %). Les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont des photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie ; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly-cristallin.

Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Une tranche de silicium (wafer) est alors découpée dans le barreau de silicium.

Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction p-n dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le wafer devient une cellule ronde ou presque carrée et vues de près, elles ont une couleur uniforme (figure I.6).



**Fig. I.6 : Panneaux PV (cellule monocristalline)**

Les panneaux PV avec des cellules poly cristallines sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 18%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines.

Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure Poly-cristalline (figure I.7).



Fig. I.7 : Panneaux PV avec cellule poly cristallines

### I.5.2.La deuxième technologie

Fait appel aux cellules de silicium amorphe. L'efficacité est moins bonne que celui des technologies poly cristallines ou monocristallines, variant de 6 à 10 %. Leur durée de vie est généralement inférieure à 20 ans.

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, et permettent d'utiliser des couches de silicium très minces qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grande surface abas coût en utilisant peu de matière première (figure I.8).



Fig. I.8 : Module photovoltaïque amorphe

### I.5.3.La troisième technologie (non silicium)

Les recherches actuelles sur les matériaux PV portent également sur d'autres matériaux que le silicium, mieux adaptés à une utilisation en couches minces et délivrant de hauts rendements à des coûts relativement bas. Deux filières semblent s'imposer progressivement, l'une basée sur le

tellure de cadmium (notée  $C_dT_e$ ) et l'autre sur les alliages Cuivre-indium/gallium-Sélénium (noté CIGS).

La technologie CIGS exhibe actuellement le meilleur rendement de production pour une cellule et pour des modules par rapport à toutes les technologies couches minces inorganiques avec des cellules pouvant atteindre 19.9% en laboratoire et des modules commerciaux de 12%. Cependant, il reste un grand nombre de points à améliorer afin de réduire le prix de ces cellules.

Dans le cas de la technologie à base de Tellure de Cadmium - ( $C_dT_e$ ), la simplicité chimique du matériau et sa stabilité en font un matériau attractif. Ses propriétés thermo-physiques et ses caractéristiques chimiques permettent de fabriquer des cellules simplement et à faible coût. D'un point de vue rendement énergétique, la filière  $C_dT_e$ , présente des rendements de cellules dépendent fortement de la manière dont les couches actives sont déposées (température de dépôt, vitesse et nature du substrat), qui record de 16.5% en laboratoire et des modules commerciaux à près de 10.7%.

Comparé aux autres technologies couche mince, le  $C_dT_e$  est plus facile à déposer et donc plus approprié à la production de module PV de surface importante. L'inconvénient majeur actuel repose sur la toxicité reconnue du Cadmium bien qu'il a été démontré que les risques environnementaux liés aux cellules PV en  $C_dT_e$  sont minimes. En effet, les modules en  $C_dT_e$  ne présenteraient pas de risques sanitaires et environnementaux.

## I.6. Paramètres d'une cellule photovoltaïque [2] [4]

Ces paramètres sont déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes :

### I.6.1. Courant de court-circuit

Le courant de court-circuit  $I_{CC}$  est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal ( $R_{ser}$  nulle et  $R_{shu}$  infinie), ce courant se confond avec le photo-courant  $I_{ph}$  dans le cas contraire, en annulant la tension  $V$  dans l'équation (I.1), on obtient :

$$I_{CC} = I_{ph} - I_{Sat} \left[ \exp \left( \frac{e \cdot (I_{CC} \cdot R_S)}{nKT} \right) - 1 \right] - \left( \frac{I_{CC} \cdot R_S}{R_{shu}} \right) \quad (I.1)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$$I_{Sat} \left[ \exp \left( \frac{e \cdot (I_{CC} \cdot R_S)}{nKT} \right) - 1 \right] \text{ devant } I_{ph}$$

L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{CC} = \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right)} \quad (I.2)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement  $I_{CC} = I_{ph}$ ).

### I.6.2. Tension de circuit-ouvert

La tension de circuit-ouvert c'est la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{CC} - I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{e \cdot (V_{pv})}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_p} \quad (I.3)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{CO} = V_T \left[ \frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (I.4)$$

### I.6.3. Rendement énergétique

Rendement énergétique c'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule  $P_{max}(I_{opt}, V_{opt})$  et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt} V_{opt}}{P_{inc}} \quad (I.5)$$

Avec  $P_{inc}$  est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

### I.6.4. Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule  $P_{max}(I_{opt}, V_{opt})$  et le produit du courant de court-circuit  $I_{cc}$  par la tension de circuit-ouvert  $V_{co}$  (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante. Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites  $R_{ser}$  et  $R_{shu}$ . Il est défini par :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} V_{co}} = \frac{I_{opt} V_{opt}}{I_{cc} V_{co}} \quad (I.6)$$

## I.7. Architecture classique d'un générateur photovoltaïque

Dans des conditions d'ensoleillement standard ( $1000W/m^2, 25^{\circ}C$  AM1.5), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de  $150\text{ cm}^2$  est d'environ  $2.3\text{ W}_c$  sous une tension de  $0.5V$ . Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires [2].

**I.7.1. Module et groupement de cellules en série**

Une association de  $N_s$  cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, (figure I.9-a). Si l'une d'elles était plus faible en courant, elle imposerait son courant à toute la série ce qui pénaliserait le module complet, c'est pour ça, il ne faudra connecter en série que des cellules identiques. L'équation (I.3) résume les caractéristiques électriques d'une association série de ns cellules [2], [6].

$$V_{cons} = n_s * V_{co} \text{ Avec } I_{CC} = I_{CCn_s} \tag{I.7}$$

Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ( $V_{cons} = 0.6V * 36 = 21.6V$ ) afin d'obtenir une tension optimale du panneau  $V_{opt}$  proche de celle d'une tension de batterie de  $12V$ .

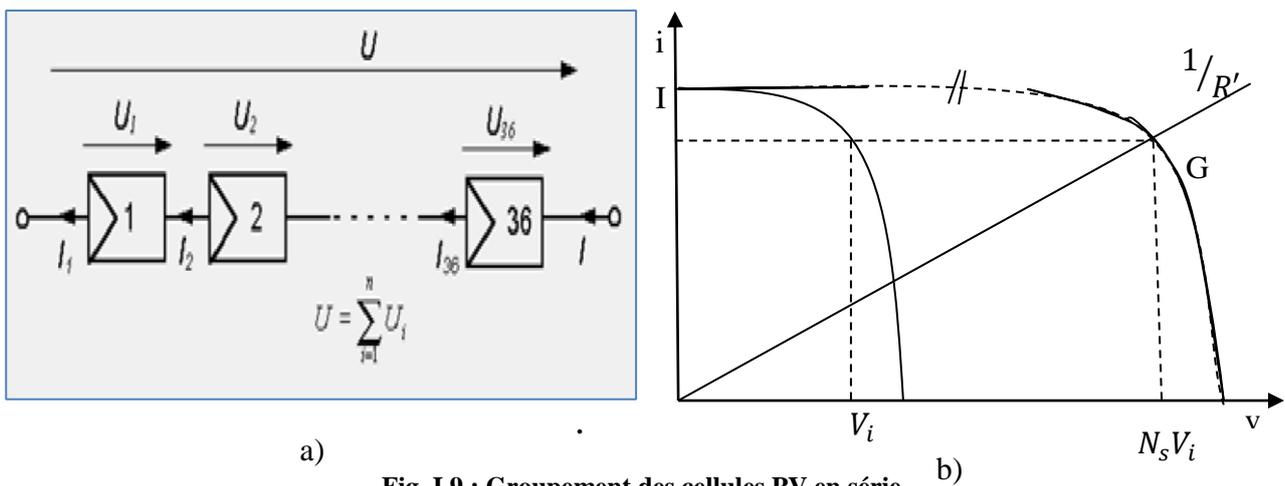


Fig. I.9 : Groupement des cellules PV en série

La figure (I.9-b) présente la courbe de puissance (caractéristique courant-tension) du groupement de l'une des  $N_s$  cellules du groupement série. La caractéristique du groupement (G) est obtenue en multipliant point par point et pour un même courant, la tension par  $N_s$ . Fermé sur l'impédance  $R'$ , le groupement série délivrera le courant  $I$  sous la tension  $N_s \times V_i$ . Chacune des  $N_s$

cellules générant ce courant  $I$  et la tension  $V_i$ . La construction graphique de la figure (I.9-b) suppose que la connexion en série des cellules n'introduit pas de résistances parasites (série ou shunt) supplémentaires [3].

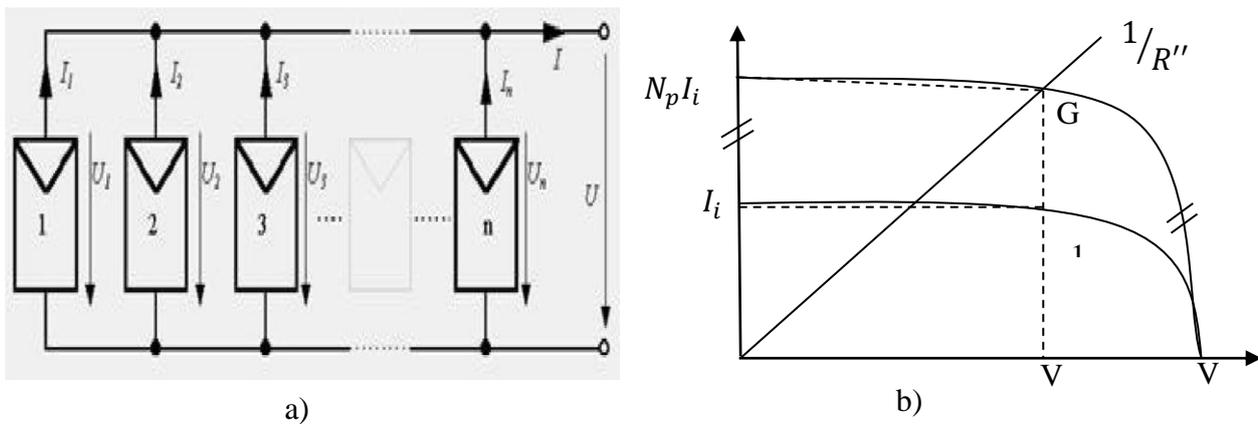
**I.7.2. Groupement de cellules ou modules en parallèle**

L'association parallèle de  $N_p$  cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants (figure I.10-a). L'équation (I.4) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de  $N_p$  cellules [2], [6].

$$I_{SCnp} = n_p * I_{SC} \text{ Avec } V_{OCnp} = V_{OC} \tag{I.8}$$

Il faudra donc appairer les tensions et non les courants, lors de la mise en parallèle des modules photovoltaïques pour constituer un générateur plus puissant [2], [6].

Sur cette figure, les générateurs de courant représentent soit des cellules individuelles, soit des cellules en série (modules), soit des modules en série (branches). On constate dans ce cas que c'est la tension générée qui est la même pour toutes les cellules (ou tous les modules ou toutes les branches).



**Fig. I.10 : Groupement des cellules PV en parallèle**

La deuxième règle est donc qu'il ne faudra connecter en parallèle que des cellules des modules, ou des branches identiques comme il est illustré à la figure (I.10-a). La figure (I.10-b) présente la courbe de puissance résultante ( $G$ ) pour le groupement parallèle considéré.

Cette courbe est obtenue en multipliant point par point par  $N_p$  (nombre d'éléments en parallèle) et pour chaque valeur de la tension, le courant de la courbe correspondant à une cellule élémentaire fermé sur une résistance  $R''$ , chacune des  $N_p$  branches en parallèle générant le courant  $I_i$ . La

construction graphique de la figure (I.10-b) suppose que la connexion en parallèle n'introduit pas des résistances parasites (série ou shunt) supplémentaires [3], [6].

### I.7.3. Association série-parallèle

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle [6].

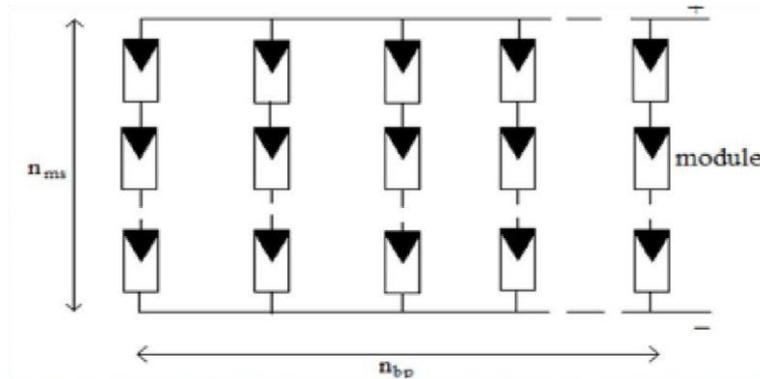


Fig. I.11 : Association mixte des cellules solaire

## I.8. Avantages et Inconvénients du solaire photovoltaïque

Le système photovoltaïque en tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients [2] [5].

### I.8.1. Les avantages

- Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, peu sujette à l'usure, mais demande peu d'entretien.
- Le montage des installations photovoltaïques est simple et elles sont adaptables aux besoins de chaque projet.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse, ce qui est contraire aux installations éoliennes. C'est une énergie inépuisable, propre et non polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchet.
- Le coût de fonctionnement des systèmes photovoltaïques est très faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible ni transport ni personnel hautement spécialisé.

### I.8.2. Les inconvénients

Le système photovoltaïque a également des limites que nous résumons ainsi :

- La fabrication des panneaux solaires photovoltaïques relève de la haute technique demandant énormément de recherche et de développement et donc des investissements coûteux d'où le prix d'installation qui reste très cher.

- Le rendement des panneaux photovoltaïques est de l'ordre de 28% pour les cellules au silicium cristallin.
- Le stockage de l'énergie sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le cout du générateur photovoltaïque est accru.
- La fiabilité et les performances du système restent équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulation associés soient judicieusement choisis.

### **I.9. Conclusion**

Depuis quelques années, le monde de la conversion photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau industriel, connaît une mutation profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque.

Dans ce chapitre nous avons exploré le principe de la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes technologies utilisées pour parvenir.

Nous avons expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leur rendement. Puis nous avons cité les différents types d'utilisation de générateur photovoltaïque. Et cela, par exemple, le groupement des modules ou des cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque, et le groupement des cellules ou des modules en parallèle permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé.

En fin nous avons rappelé quelque avantage et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque.