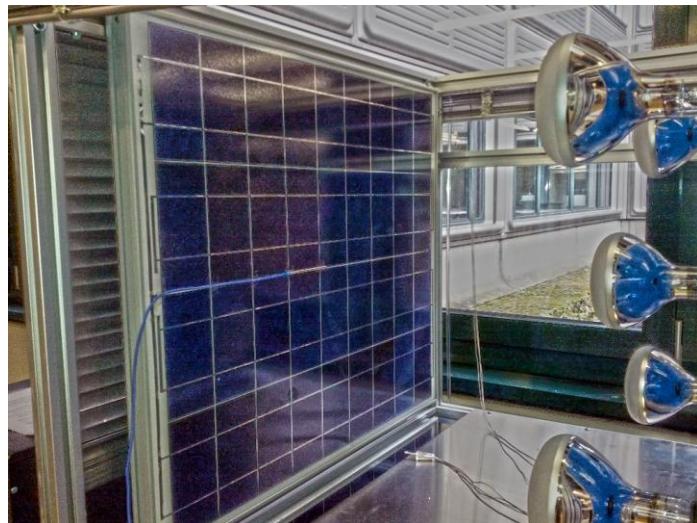


## ChE-203 TP-4 Conversion photovoltaïque de l'énergie solaire

*mode d'emploi, printemps 2022*

*--- English version below ---*



Responsable du TP:

Marco FABBIANO  
[marco.fabbiano@epfl.ch](mailto:marco.fabbiano@epfl.ch)

Responsable du cours:  
Raffaella BUONSANTI  
[raffaella.buonsanti@epfl.ch](mailto:raffaella.buonsanti@epfl.ch)

# 1. Théorie

## 1.1 Energie solaire et technologies écologiques

Les innovations technologiques de ces deux derniers siècles, ainsi que l'augmentation de la population mondiale, ont causé une explosion de la consommation d'énergie. Selon les données de l'Agence Internationale de l'Energie, de 1990 à 2008, la population mondiale a augmenté de 27%, et l'énergie moyenne consommée par personne a augmenté de 10%. En 2008, la consommation mondiale d'énergie était de 474 exajoules, EJ, (132 000 TWh). Cela équivaut à une puissance moyenne de 15 TW sur l'année.

A l'heure actuelle, plus de 80% de cette énergie est fournie par des combustibles fossiles non renouvelables. En effet, sur la base des taux actuels de consommation, et des estimations des ressources disponibles sur la planète, il ne reste du pétrole brut que pour 43 ans, du gaz naturel pour 61 ans, et du charbon pour 148 ans. A cause de l'augmentation rapide dans la demande d'énergie, et du fait qu'il a été prouvé que les combustibles fossiles ont un impact négatif sur l'environnement, il est nécessaire de leur chercher une alternative.

L'énergie nucléaire, a longtemps été considérée comme une source d'énergie « propre » prometteuse. Cependant, l'accident de Chernobyl de 1986, et la catastrophe de Fukushima Daiichi de 2011, ainsi que les difficultés rencontrées pour dégrader les résidus toxiques, sont autant de facteurs faisant du nucléaire une source d'énergie peu fiable.

Les énergies renouvelables proviennent de ressources naturelles, telles que la lumière du soleil, le vent, la pluie, les marées ou la géothermie. Environ 16% de l'énergie mondiale sont aujourd'hui fournis par des ressources renouvelables ; avec 10% provenant de la biomasse traditionnelle, principalement utilisée pour le chauffage, et 3.4% d'hydroélectricité. Cependant, la ressource renouvelable la plus abondante est l'énergie solaire. En effet, sur une année, l'énergie solaire représente le double de l'énergie fournie par l'ensemble des ressources non renouvelables de la planète, c'est à dire le charbon, le pétrole, le gaz naturel, et l'uranium.

En 2011, l'Agence Internationale de l'Energie a déclaré que « le développement de technologies provenant d'énergie solaire propre, inépuisable, et à prix abordable, aura dénormes avantages à long terme. Ceci améliorera la sécurité énergétique des pays du monde, leur permettant de s'appuyer sur une ressource locale, inépuisable et donc quasiment indépendante d'importation, favorisant le développement durable, réduisant la pollution, diminuant les couts d'atténuation des changements climatiques, et maintenant le prix des ressources fossiles au plus bas. Ces avantages concernent le monde entier. Par conséquent, les couts engendrés par les subventions au déploiement précoce de cette technologie devraient être considérés comme des investissements instructifs ; elles doivent être dispensées sagelement et doivent être mondialement partagées ». La principale technique employée pour utiliser l'énergie solaire est de la convertir directement en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque.

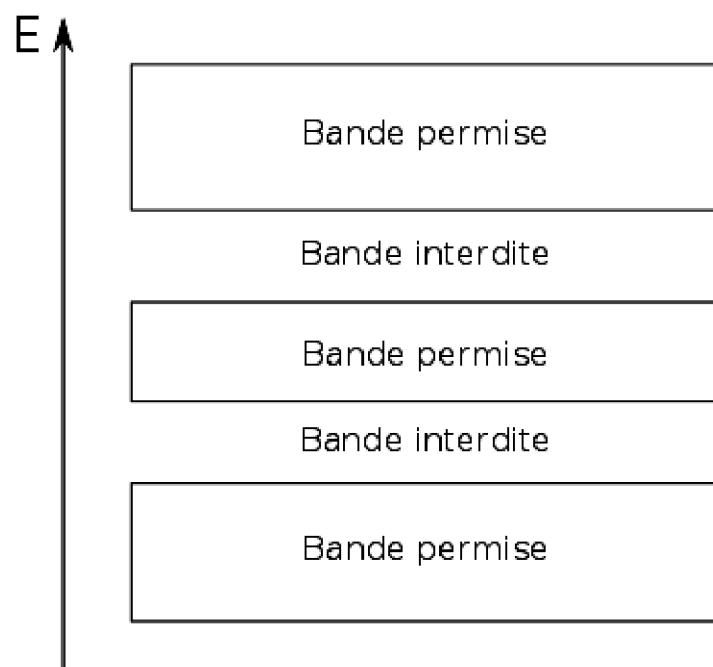
## 1.2 La cellule photovoltaïque et les panneaux solaires

### 1.2.1 Introduction

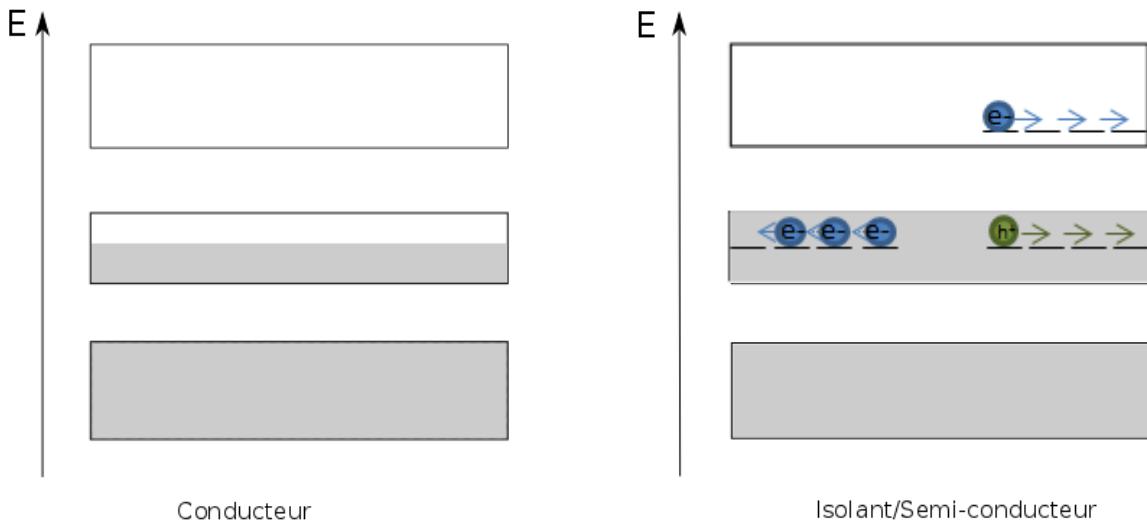
L'effet photovoltaïque (PV) se produit lorsqu'une différence de potentiel est développée entre deux matériaux lorsque leur jonction est illuminée, convertissant directement la lumière en électricité. Cet effet a été découvert en 1839 par le physicien français Henri Becquerel, et n'est sorti du laboratoire qu'en 1954, lorsque Bell produisit la première cellule photovoltaïque en silicium. Rapidement, elle trouve son application dans les programmes spatiaux des Etats-Unis, grâce une densité de puissance élevée, et est toujours une source d'énergie importante pour les satellites à ce jour. D'autre part, la technologie photovoltaïque se répand présentement également à la surface de la Terre, que ce soit pour l'alimentation de lieux isolés, ou pour contribuer à l'alimentation des réseaux électriques.

### 1.2.2. Les différents types de matériaux

Les niveaux énergétiques d'un matériau étendu et continu sont déterminés par la théorie des bandes. Celle-ci prédit que l'énergie d'un électron au sein d'un solide ne peut se situer qu'au sein de certains intervalles continus de valeurs, ou « bandes permises ». Il en découle qu'il existe des intervalles d'énergie au sein desquels aucun électron du matériau ne se trouve. On parle dans ce cas de « bande interdite ». Ceci est illustré par la figure 1.



**Figure 1** Structure de bande d'un matériau



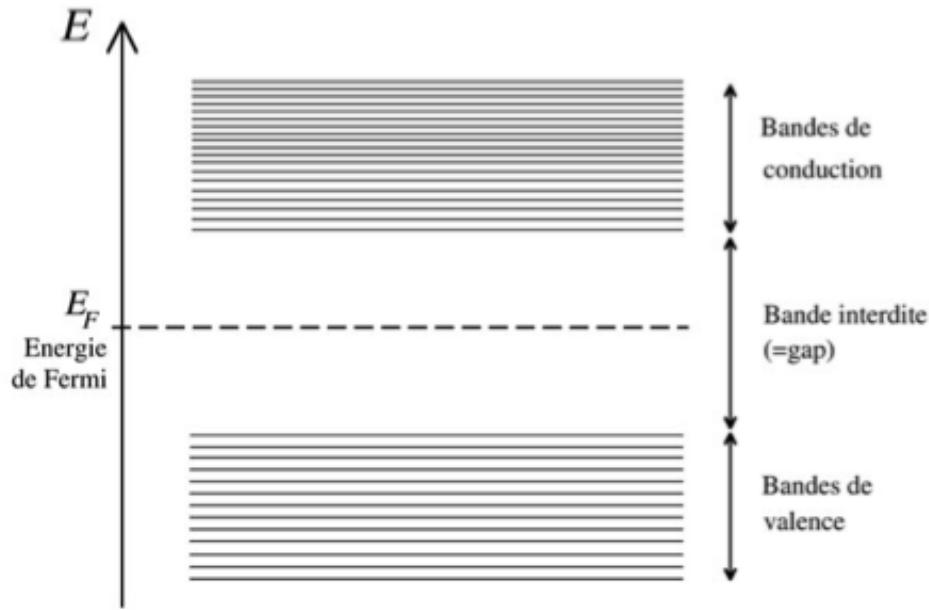
**Figure 2** Allure des niveaux électroniques d'un matériau conducteur et d'un matériau isolant, ou semi-conducteur. Les niveaux grisés sont les niveaux occupés dans l'état fondamental. Le transport de charges dans un semi-conducteur est représenté schématiquement.

Parmi les différents types de matériaux, on trouve les conducteurs. Ces matériaux présentent une structure de bande telle qu'à l'état fondamental, les plus hauts niveaux électroniques occupés se situent au sein d'une bande. Il en résulte que les électrons de ces niveaux peuvent se déplacer librement au sein du matériau sous l'effet d'un champ électrique. Par opposition, on trouve les matériaux isolants et semi-conducteurs, pour lesquels le plus haut niveau électronique occupé possède une énergie située exactement à la limite supérieure d'une bande permise. Par conséquent il n'existe pas de niveau libre accessible au sein de la bande, et les électrons ne peuvent pas se déplacer dans le matériau sous l'effet d'un champ électrique. L'allure des niveaux électroniques de ces deux matériaux est présentée sur la figure 2.

On parle de semi-conducteur lorsqu'il est possible d'ajouter des porteurs de charges dans la bande occupée la plus haute, dite bande de valence ( $E_{VB}$ ), ou la bande inoccupée la plus basse, dite bande de conduction ( $E_{CB}$ ). Dans le cas de la bande de conduction, les porteurs de charges sont des électrons étant donné qu'ils peuvent se déplacer à travers la bande vide car la majorité des niveaux d'énergie accessible à  $RT$  sont inoccupés. En revanche les électrons dans la bande de valence ne peuvent pas se déplacer, les niveaux d'énergies alentours étant déjà occupés par d'autres électrons. Pour cette raison, un porteur de charges dans la bande de valence est défini comme un état vide, soit un manque d'électron. Par simplification, ces états vides dans la bande de valence sont considérés comme des quasi-particules appelées « trou ».

Il y a deux façons d'obtenir un semi-conducteur au lieu d'un isolant: 1) lorsque la différence d'énergie entre la limite supérieur de la bande de valence ( $E_{VB}$ ), et la limite inférieure de la bande de conduction ( $E_{CB}$ ), est suffisamment faible pour qu'il soit possible d'exciter directement un électron d'une bande vers l'autre (par illumination ou thermiquement) ou 2) par dopage (voir ci-dessous). Il s'agit donc d'une notion relative. On appelle habituellement la bande interdite séparant la bande de valence de la bande de conduction d'un semi-conducteur, le « band gap » ( $E_g$ ). Enfin, un dernier paramètre intéressant des semi-conducteurs est leur niveau de Fermi ( $E_F$ ), qui correspond à l'énergie

maximale qu'un électron peut théoriquement atteindre dans le matériau à l'état fondamental et à 0K.  $E_F$  est aussi défini comme le niveau d'énergie où la probabilité qu'un site soit occupé par un électron est égale à 1/2. Ainsi, le niveau de Fermi est proportionnel à la quantité d'électrons présents dans le semi-conducteur. Pour un semi-conducteur non-dopé (ou intrinsèque), il se situe exactement au milieu du band gap. La nomenclature des semi-conducteurs est résumée sur la figure 3.



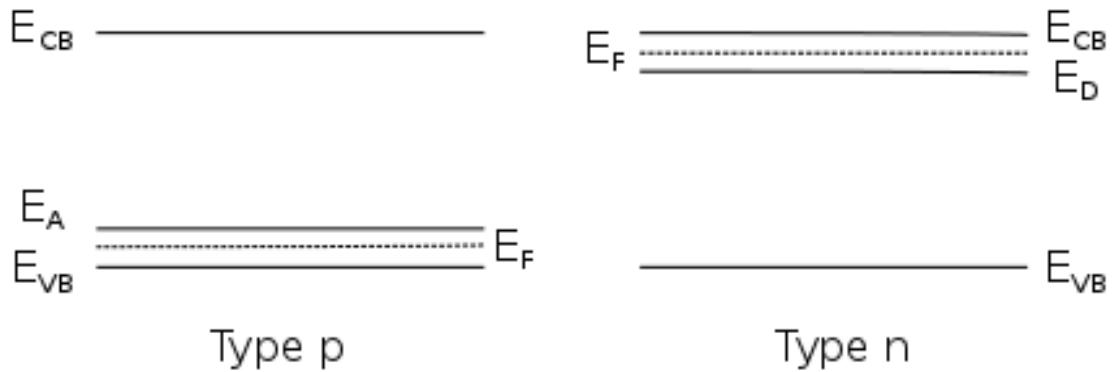
**Figure 3** Structure électronique d'un semi-conducteur.

Ainsi, lorsque l'on fournit au semi-conducteur une énergie supérieure à celle du band gap (typiquement en l'éclairant à une longueur d'onde inférieure à celle correspondant à l'énergie du band gap), il est possible de promouvoir un électron directement de la bande de valence vers la bande de conduction. Une paire électron/trou est ainsi créée, avec un électron libre de se déplacer dans la bande de conduction, et un trou libre de se déplacer dans la bande de valence. Le matériau devient ainsi conducteur et les charges créées peuvent être utilisées pour alimenter une charge extérieure. Le semi-conducteur actuellement le plus employé dans la technologie photovoltaïque est le silicium.

### 1.2.3. La jonction p-n et la cellule photovoltaïque

Lorsqu'on conçoit un semi-conducteur, un paramètre important est celui du dopage. Il s'agit d'introduire en proportions infimes une impureté qui va « doper » la conductivité du semi-conducteur. Dans le cas du silicium, on peut le doper avec des atomes de phosphore ou des atomes de bore. Le phosphore, en remplaçant les atomes de silicium, va apporter un excès d'électrons dans la bande de conduction en s'oxydant ( $P \rightarrow P^+$ ), on parle de dopage de type n. Au contraire ajouter du bore produit un déficit d'électrons dans la bande de valence en se réduisant ( $B \rightarrow B^-$ ), on parle alors de dopage de type p. Dans les deux cas, le dopant injecte des porteurs de charges (électrons pour le type n et trous pour

le type p) dans le semi-conducteur. Dans les deux cas, la charge fixe sur le dopant est compensée par une charge libre (trou ou électron) dans le semi-conducteur. Le dopage modifie aussi la position du niveau de Fermi, celui-ci étant proportionnel au nombre d'électrons présent dans le semi-conducteur. Les diagrammes de bande des deux types de semi-conducteurs sont représentés sur la figure 4.



**Figure 4** Diagramme de bandes de semi-conducteurs dopés

Lorsqu'un semi-conducteur de type p et un semi-conducteur de type n sont mis en contact, on crée une jonction p-n. Lors de la mise en contact, les électrons diffusent du matériau de type n, possédant un excès d'électrons, vers le matériau de type p, possédant un déficit d'électrons. Ce processus de diffusion continue jusqu'à ce que les niveaux de Fermi des deux matériaux soient égaux. On est alors à l'équilibre. Cependant, la diffusion des charges libres laissent les atomes de dopants proche de la jonction non neutralisé, brisant localement l'électro-neutralité. Ceux-ci génèrent donc un champ au sein même de la jonction. Il en découle que les positions respectives des bandes d'énergie sont modifiées et on obtient une structure de diode, avec un champ électrique interne au matériau, où les électrons promus dans la bande de conduction tendent à être attirés par la zone de type n, plus basse en énergie, alors que les trous de la bande de conduction sont attirés dans la zone de type p. On obtient une structure de diode. Ainsi lorsque l'on illumine la jonction, les photons communiquent leur énergie aux électrons, des paires électrons-trous sont créées, les charges sont séparées par le champ électrique, et l'on obtient un courant électrique. Cela est résumé sur la figure 5.

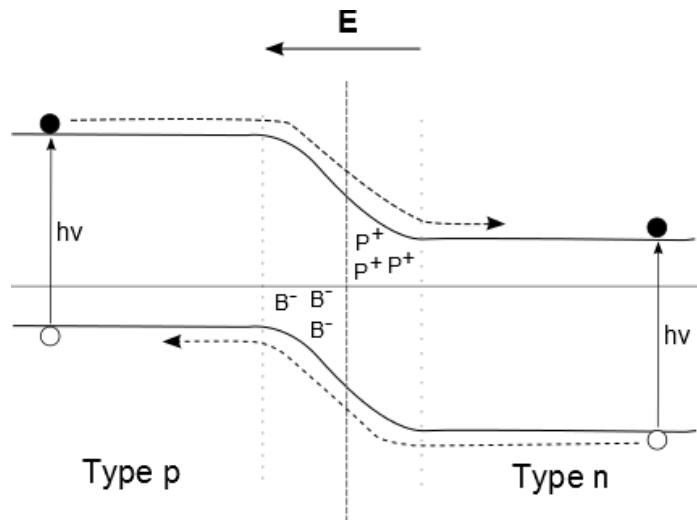


Figure 5 Diagramme énergétique d'une jonction p-n

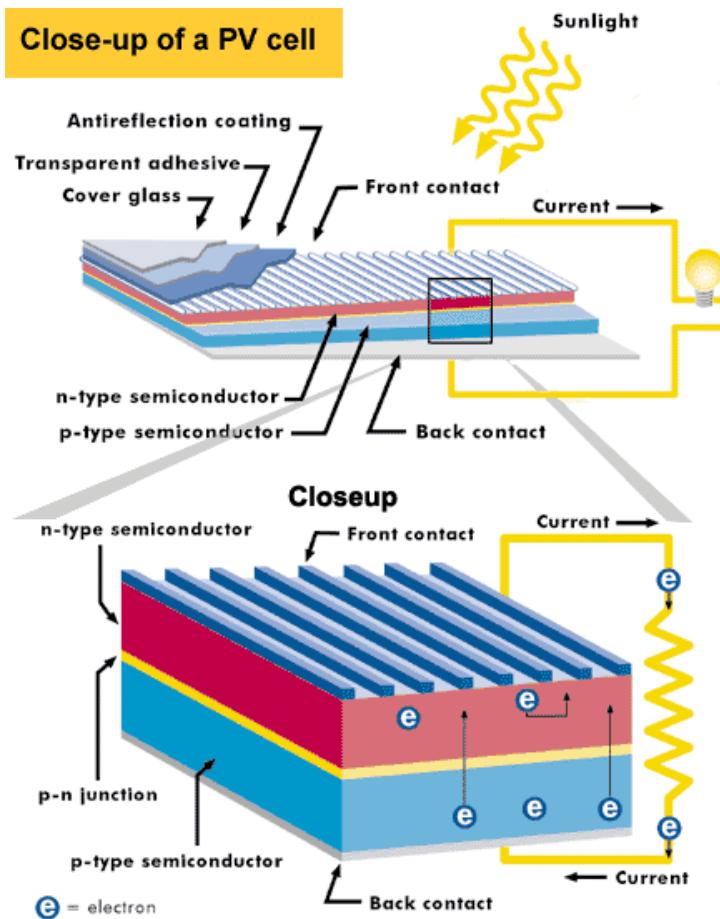
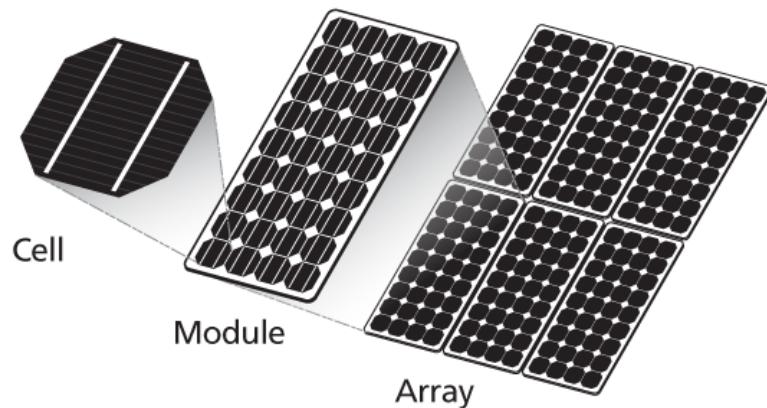


Figure 6 Différentes épaisseurs de matériau présentes dans une cellule photovoltaïque. Le schéma du bas est un agrandissement de la partie permettant de produire du courant électrique à partir d'énergie solaire

En pratique, on dispose des contacts métalliques sur les deux faces de la jonction, afin de récolter les courant électrique. En général une feuille conductrice de contact est déposée sur la face inférieure et les bords de la face supérieure (illuminée) de la cellule. Ensuite, un grillage conducteur est déposé sur la face supérieure, de manière à récolter le courant, tout en laissant passer la lumière. L'optimisation de l'écartement des fibres conductrices dans la maille du grillage est une question de compromis entre maximisation de la conductance électrique, et minimisation du blocage de la lumière. En outre, d'autres éléments sont ajoutés lors de la construction des cellules pour améliorer leurs propriétés. Par exemple, la face extérieure de la cellule est munie d'une couche antireflet, de manière à ce qu'un maximum de lumière soit absorbé par la cellule. On utilise aussi un verre de protection, appliqué avec un adhésif transparent pour assurer la protection mécanique de la cellule.

#### 1.2.4. Module solaire et panneau solaire

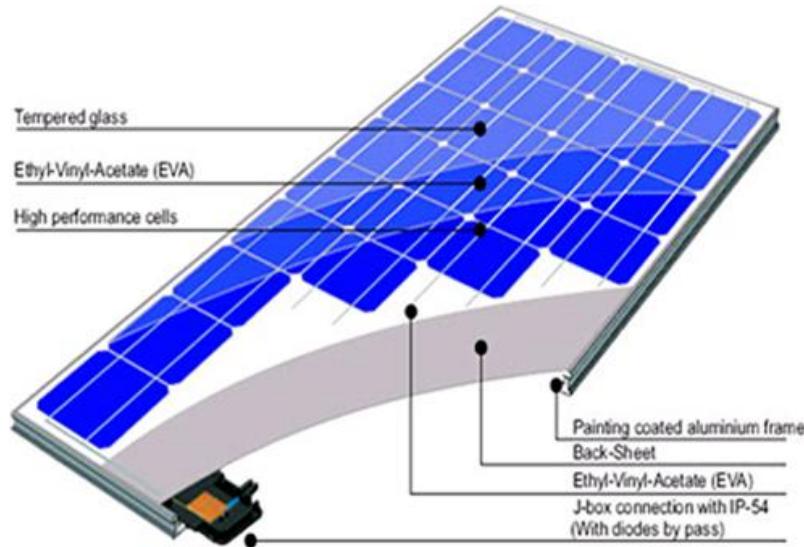
La cellule photovoltaïque décrite précédemment est l'unité de base d'un système photovoltaïque. En règle générale, la cellule mesure quelques centimètres carrés et génère environ une puissance d'1 Watt. Afin de générer une puissance supérieure, on connecte plusieurs cellules en série et en parallèle sur un module d'environ 0.5 à 1 m<sup>2</sup>.



**Figure 7** Les différentes unités d'un panneau solaire photovoltaïque

Différents modules sont ensuite connectés électriquement en série et en parallèle pour former un panneau solaire, qui génère le courant et la tension désirés. La figure 8 représente la construction d'un module solaire supporté par un cadre, que l'on peut fixer sur un support ou une structure. Le montage des modules peut se faire selon de nombreuses configurations différentes. On peut ainsi par exemple les monter sur un support spécifiquement adapté à la pose sur le toit d'un bâtiment. Avec les récents développements de panneaux de silicium amorphe, on peut même désormais directement utiliser les feuillets photovoltaïques comme bardage dans la toiture, permettant ainsi de réduire les coûts en matériau et en

main-d'œuvre.

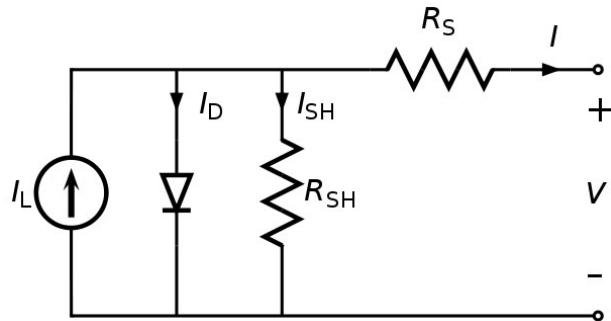


**Figure 8** Composition d'un module solaire

### 1.3. Caractérisation électrique d'un montage photovoltaïque

#### 1.3.1 Circuit électrique équivalent

La cellule photovoltaïque est généralement représentée par le circuit électrique suivant :



On y trouve les paramètres suivants. Le courant de sortie  $I$  est égal au courant généré par l'éclairage (ou photo-courant)  $I_L$ , moins le courant de diode  $I_D$  et le courant de fuite  $I_{SH}$ .

$$I = I_L - I_D - I_{SH}$$

La résistance en série  $R_s$  représente la résistance interne de la cellule, et dépend notamment de la profondeur de la jonction p-n, des impuretés et de la résistance de contact.

La résistance de shunt  $R_{sh}$  est inversement proportionnelle au courant de fuite à la terre. Dans une cellule photovoltaïque idéale,  $R_s = 0$  et  $R_{sh} = \infty$ . En réalité, dans une cellule en silicium de très bonne qualité, et d'un pouce carré ( $6.45 \text{ cm}^2$ ), on a typiquement  $R_s = 0.05 - 0.10 \text{ Ohms}$  et  $R_{sh} = 200 - 300 \text{ Ohms}$ . Le rendement de la cellule est sensible à de petites variations de  $R_s$ , mais est globalement insensible aux variations de  $R_{sh}$ . Le voltage créé à travers la diode et le shunt  $V_j$  est défini par :

$$V_j = V + IR_s$$

L'équation de Schottky pour la diode donne alors :

$$I_D = I_0 \exp\left(\frac{qV_j}{nkT} - 1\right)$$

où  $I_0$  est le courant de saturation inverse de la diode,  $q$  est la charge élémentaire ( $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ),  $n$  est le facteur d'idéalité de la diode ( $n = 1$  pour une diode idéale),  $k$  est la constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ), et  $T$  est la température (en K).

Par conséquent, le courant de sortie est donné par :

$$I = I_L - I_0 \exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT} - 1\right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

Le dernier terme, le courant de fuite à la terre, est faible comparé à  $I_L$  et  $I_0$ , et peut généralement être négligé. On peut donc déterminer le courant de saturation inverse de la diode en se plaçant à courant nul (circuit ouvert,  $I = 0$ ) et dans le noir ( $I_L = 0$ ). On mesure alors la tension et le courant d'entrée de la diode pour déterminer le courant de saturation inverse de la diode.

### 1.3.2 Tension de circuit ouvert et courant de court-circuit

Deux paramètres importants pour décrire les performances électriques de la cellule photovoltaïque sont la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  et le courant de court-circuit  $I_{sc}$ . Ce dernier est mesuré en court-circuitant les bornes de sorties et sous illumination complète de la cellule. Si on néglige les faibles courants de diode et de fuite à la terre dans ces conditions ( $R_s$  est faible et  $R_{sh}$  élevé), le courant de court-circuit est le photocourant  $I_L$  :

$$I_{sc} = I_L$$

La tension photoélectrique maximale est produite à circuit ouvert, à  $I = 0$ . De nouveau en négligeant les fuites à la terre, on obtient que :

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right)$$

où la constante  $kT/q$  est la température absolue exprimée sous la forme d'une tension

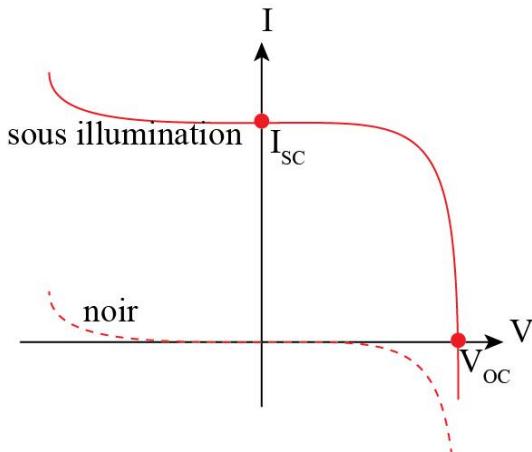
(300K correspondant à 0.026V). En pratique, le photo-courant  $I_L$  d'une cellule photovoltaïque est plusieurs ordres de grandeur supérieur au courant inverse de saturation  $I_0$ . Par conséquent  $V_{oc}$  est très supérieure à  $kT/q$ .

Sous éclairement constant,  $I_L/I_0$  dépend relativement fortement de la température, et on observe une diminution de la tension de circuit ouvert avec une augmentation de la température de la cellule.

### 1.3.3 Courbes I-V et P-V

La caractéristique électrique de la cellule photovoltaïque est généralement présentée sous la forme d'une courbe intensité-tension (ou courbe I-V). L'allure de cette courbe dans le noir et sous illumination est présentée sur la figure 9. A tension nulle, on obtient le courant de court-circuit  $I_{sc}$ , en haut à gauche du quadrant des tensions positives lorsque la cellule est éclairée. A courant nul on retrouve la tension maximale  $V_{oc}$ , en bas à droite du diagramme.

Dans la région hachurée de droite, le courant diminue rapidement lorsqu'on augmente la tension. La cellule se comporte alors comme une source de tension constante avec une résistance interne. Dans la région hachurée de gauche, la cellule fonctionne comme une source de courant constant, générant une tension correspondant à la résistance de charge. Entre ces deux régions, on observe un coude.

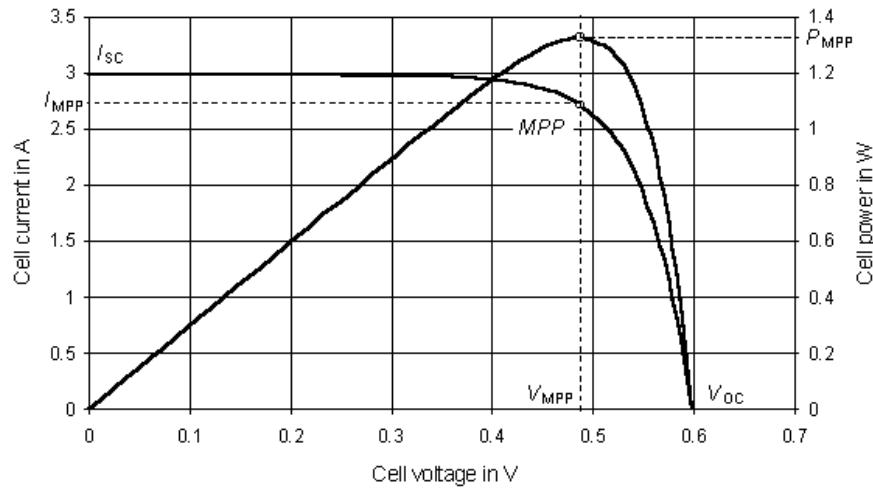


**Figure 9** Courbes I-V, dans le noir et sous illumination, d'une cellule photovoltaïque

Si l'on applique une tension négative à la cellule, le courant reste constant et la puissance fournie est absorbée par la cellule. Cependant, au-delà d'une certaine valeur, la jonction se rompt et le courant augmente rapidement. On parle de tension de claquage. Sa valeur est la même que l'on soit dans l'obscurité ou sous illumination.

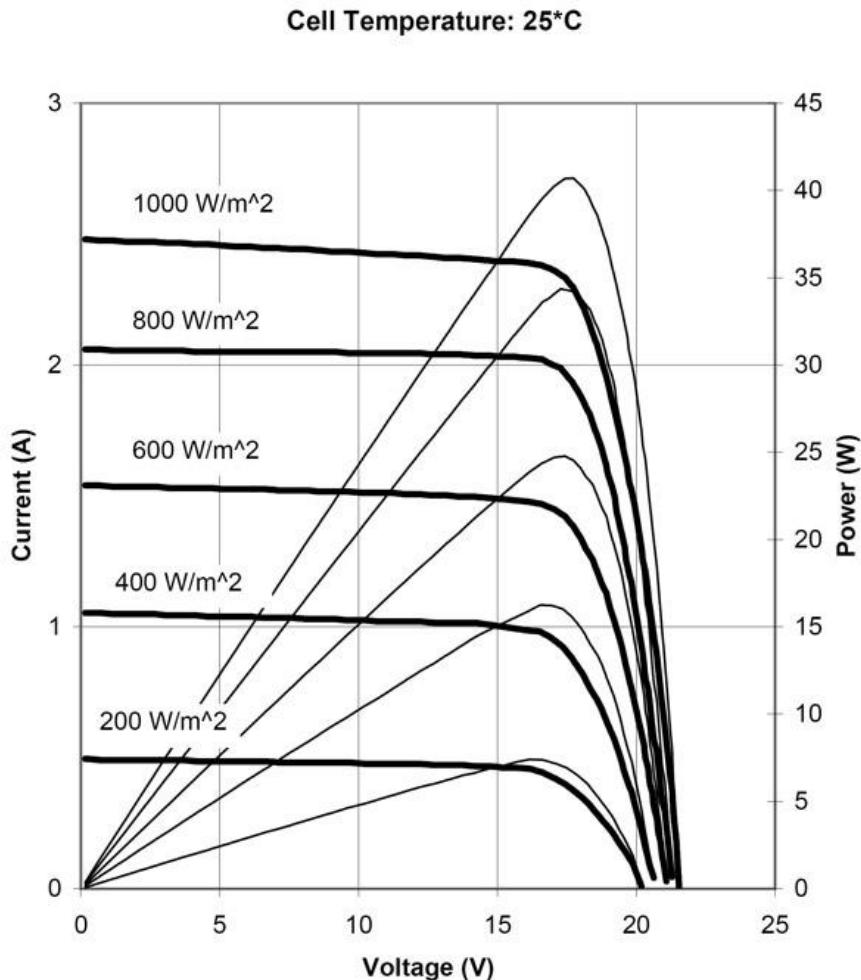
La puissance délivrée par la cellule correspond au produit de la tension de sortie par le courant de sortie. La figure 10 représente une caractéristique puissance-tension (P-V) de la cellule. On observe que la puissance est nulle à circuit-ouvert et lors d'un court-circuit. La puissance maximale est obtenue au niveau du coude de la courbe I-V. Par conséquent, les modules photovoltaïques sont conçus pour fonctionner dans des conditions proches de

ce coude. En pratique, on se situe légèrement à gauche du coude, là où le panneau se comporte comme une source de courant constant.



**Figure 10** Courbe P-V d'une cellule photovoltaïque sous illumination

La figure 11 représente les caractéristiques I-V d'un panneau de 40W sous quatre intensités d'éclairement solaire différentes : 1000 W/m<sup>2</sup> à 200 W/m<sup>2</sup>. Ces courbes sont enregistrées sous une masse d'air (AM) de 1.5. Une masse d'air nulle (AM0) représente les conditions du vide spatial, où la radiation solaire est de 1350 W/m<sup>2</sup>. AM1 représente des conditions terrestres idéales, dans un milieu où l'air est pur et lorsque les rayons du soleil subissent le moins de résistance avant d'atteindre la surface de la Terre. En prenant en compte l'humidité et la pollution moyennes présentes dans l'air de tous les jours, on se trouve dans des conditions AM1.5, que l'on utilise comme référence.



**Figure 11** Courbes I-V obtenues pour un panneau solaire de 40W à différentes illuminations.

La puissance solaire en incidence normale sur une surface en conditions AM1.5, par une journée ensoleillée, est d'environ 1000 W/m<sup>2</sup>. Par temps nuageux, l'intensité lumineuse décroît et on utilise habituellement la valeur de 500 W/m<sup>2</sup> dans l'industrie pour rapporter les courbes I-V.

#### 1.3.4. Efficacité et Facteur de remplissage

L'efficacité de conversion d'une cellule photovoltaïque est définie par :

$$\eta = \frac{\text{puissance électrique de sortie}}{\text{puissance solaire irradiant la cellule}}$$

Le facteur de remplissage (FF) est le rapport entre la puissance maximale (obtenue au pic de la courbe P-V ou au coude de la courbe I-V) et le produit de  $I_{sc}$  par  $V_{oc}$ :

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{SC}V_{OC}} = \frac{I_{\max}V_{\max}}{I_{SC}V_{OC}}$$

Le facteur de remplissage détermine la qualité d'une caractéristique I-V. Sa valeur est supérieure à 0.7 pour de bonnes cellules. Les résistances  $R_S$  et  $R_{SH}$  causent une diminution de ce facteur de remplissage. Ce facteur est un paramètre utile utilisé lors des contrôles de qualité de panneaux solaires.

## 2. Procédure expérimentale

Avant de commencer le TP :

- Allumer l'interface et le module DC, ainsi que l'ordinateur
- Baisser les rideaux autour du module lampes-panneaux solaires
- Ne pas fixer les lampes, lorsqu'elles sont allumées, sans lunettes de protection.
- Lancer le programme EESFC situé sur le bureau de l'ordinateur
- **Attention : lorsque l'on éteint les lampes, il faut attendre qu'elles refroidissent suffisamment avant de pouvoir les rallumer**

Le montage se compose de deux panneaux solaires en silicium cristallin de  $0.512 \text{ m}^2$  connectables en série ou en parallèle. Ces panneaux peuvent être illuminés par cinq lampes chacun (SUN-1 et SUN-2). L'intensité de l'éclairage peut être variée en sélectionnant différentes positions pour ces deux paramètres dans le logiciel. Chacun des modules peut être illuminé indépendamment.

Les caractéristiques du courant continu issu des panneaux peuvent être mesurées dans le module « DC Load ». Les valeurs de voltage et d'intensité sont affichées dans le logiciel (V-DC et I-DC). On peut connecter les panneaux à, des lampes, un rhéostat dont on peut faire varier la valeur, ou un moteur, dans ce module.

A partir de ce module, on peut alimenter une batterie, ou encore transformer le courant continu en courant alternatif pour alimenter des lampes ou un moteur dans le module « AC Load ». Ce module ne sera pas étudié dans le TP.

On peut mesurer la densité de puissance de radiation avec le capteur SRL. La valeur s'affiche en  $\text{W/m}^2$  dans le logiciel.

Avant de cliquer sur START, vérifier les paramètres suivants :

- Le rhéostat doit être positionné sur une valeur différente du maximum ou du minimum (au milieu est bien)
- Les panneaux doivent être configurés en parallèle
- La mesure doit se faire avant le régulateur
- Le courant et la tension doivent être mesurés sur le panneau solaire 2

Pour obtenir la courbe I - V d'un panneau, suive la procédure suivante :

Cliquer sur START pour lancer le programme

Mettre l'éclairage maximal sur le panneau solaire 2 (SUN-2) et allumer les ventilateurs. On choisit ce panneau car la température se stabilise plus rapidement plus près des ventilateurs.

Attendre que la température du panneau solaire se stabilise (cela prend habituellement entre 15 et 20 minutes).

Une fois que la température est constante, sélectionner la position 2 pour alimenter le rhéostat (Interrupteur « rhéostat » sur ON et interrupteur « lampes » sur OFF).

Tracer la courbe I-V du panneau, à l'aide du programme, à partir de cette configuration.

**Note :** Pour tracer la courbe à l'aide du programme, on peut enregistrer les paramètres mesurés par l'interface à une fréquence voulue. Pour ce faire il suffit de cliquer sur « Save Data ». Pour observer et tracer les données enregistrées, il faut alors cliquer sur « Quit » puis sur « View data ». Cependant, cela aura pour effet d'éteindre les lampes, et il faudra attendre qu'elles refroidissent avant de pouvoir les rallumer.

On peut répéter cette procédure dans différentes conditions pour étudier l'influence de certains facteurs sur les performances du panneau.

### **3. Compte-rendu**

Une entreprise vous contacte pour s'équiper en panneaux solaires. Avant de faire affaire avec vous, elle vous demande de lui transmettre les caractéristiques de votre produit.

1. Donner un tracé de la caractéristique I-V du panneau solaire à l'intensité lumineuse maximale disponible, sans oublier de préciser la température à laquelle celle-ci a été mesurée.
2. Donner la valeur des paramètres d'intérêt ( $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $FF$ ,  $\eta$ ) permettant de caractériser votre panneau solaire et indiquer, si possible, leur position sur la courbe I-V.
3. Calculer l'efficacité de votre panneau solaire à la température de la mesure

L'entreprise vous indique qu'elle souhaite utiliser s'équiper en panneaux solaires sur deux sites situés dans des régions différentes. Elle vous demande donc si les performances de votre produit varient avec leur emplacement.

4. Quels sont les deux principaux facteurs qui peuvent influer sur les performances d'un panneau solaire en fonction de leur emplacement ?
5. Montrer graphiquement l'évolution de la courbe I-V du panneau solaire en fonction de chacun de ces paramètres (rassembler les courbes sur un graphe pour chaque paramètre).
6. Tracer l'évolution des paramètres d'intérêt et de l'efficacité du panneau solaire en fonction de ces deux paramètres.
7. Tenter d'expliquer la ou les causes des variations causées par l'intensité lumineuse (et la température (bonus)) d'un point de vue fondamental (i.e. en se basant sur la théorie des bandes et de la formation d'une jonction p-n)
8. Proposer et justifier des emplacements géographiques optimaux pour l'utilisation des panneaux solaires.

## **Structure**

- 1- Abstract (Résultat principal et conclusion courte)
- 2- Introduction (théorie)
- 3- Section expérimentale (Configuration et procédure expérimentale)
- 4- Résultats et discussion
- 5- Conclusions
- 6- Références
- 7- Annexe (si nécessaire)

- **Lire le protocole avant le laboratoire, la préparation de l'élève sera prise en compte pour les notes finales**
- **Certaines questions seront posées pendant le laboratoire**
- **Répondez à toutes les questions du protocole et suivez la structure comme si c'était un document scientifique – utilisez des références (documents, site Web) et citez-les.**  
**On vérifiera s'ils existent.**
- **NE PAS UTILISER chatGPT pour rédiger votre rapport, ou l'utiliser pour trouver des références ou des explications.**  
**Les points seront soustraits si nous découvrons qu'il a été écrit par AI.**

# English version

## 1. Theory

### 1.1 Solar energy and green technologies

The technological innovations of the last two centuries, as well as the increase of the world population, caused an explosion of the consumption of energy according to the data of the International Energy Agency, from 1990 to 2008, the world population increased by 27%. In 2008, the global energy consumption was 474 exaJoules, EJ (132.000 TWh). This equates to an average power of 15 TW over the year.

At present, more than 80% of this energy is supplied by non-renewable fossil fuels. Indeed, based on current consumption rates, and estimates of available resources on the planet, crude oil remains for only 43 years, natural gas for 6 years and coal for 148 years. Because of the rapid increase in energy demand, and the fact that fossil fuels have been proven to have a negative impact on the environment, it is necessary to look for an alternative. Nuclear energy has long been considered a promising clean energy source. However, the accident of Chernobyl in 1986, and the disaster of Fukushima Daiichi in 2011, as well as the difficulties in degrading toxic residues, are all factors making nuclear power an unreliable source of energy.

Renewable energies come from natural resources, such as the sunlight, wind, rain, tidal or geothermal energy. About 16% of the world's energy is now supplied by renewable resources ; with 10% coming from traditional biomass, mainly used for heating, and 3.49% from hydroelectricity. However, the most abundant renewable resource is solar energy. Indeed, over a year, solar energy represents twice the energy provided by all the non renewable resources of the planet, namely coal, oil, natural gas and uranium. In 2011, the International Energy Agency stated that « the development of technologies from clean, inexhaustible, affordable solar energy will have enormous long-term benefits. This will improve the energy security of the countries of the world, allowing them to rely on a local resource, inexhaustible and therefore almost independent of import, promoting sustainable development, reducing pollution, reducing the cost of climate change mitigation and keeping the price of fossil resources down. These benefits affect the entire world. Therefore, the costs of grants for early deployment of this technology should be seen as instructive investments ; they should be delivered wisely and be shared globally. » The main technique used to use solar energy is to convert it directly into electricity from a photovoltaic cell.

### 1.2 The photovoltaic cell and the solar panels

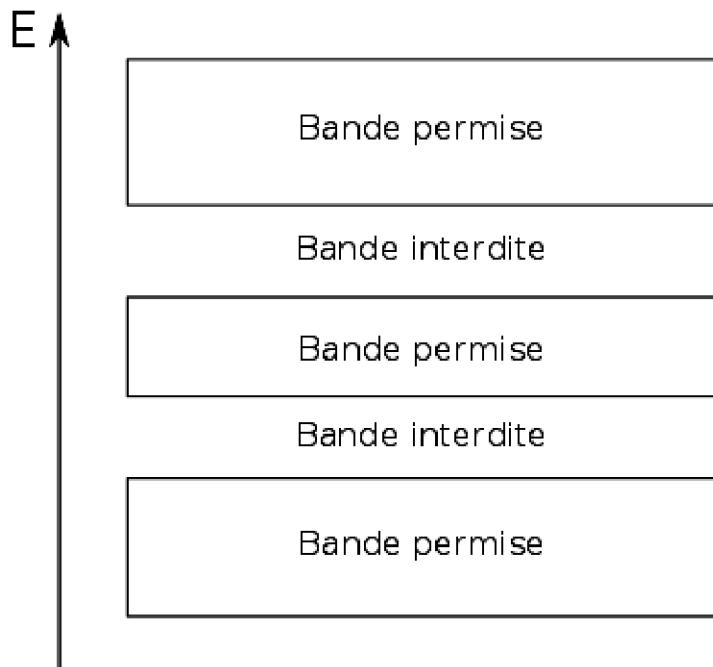
#### 1.2.1 Introduction

The photovoltaic (PV) effect occurs when a potential difference is developed between two materials when their junction is illuminated, directly converting light into electricity. This

effect was discovered in 1839 by the French physicist Henri Becquerel, and only came out of the laboratory in 1954, when Bell produced the first silicon photovoltaic cell. It quickly found application in US space programs, thanks to high power density, and is still an important source of energy for satellites to date. On the other hand, photovoltaic technology is now also spreading on the surface of the Earth, whether for the supply of isolated places, or to contribute to the supply of electricity networks.

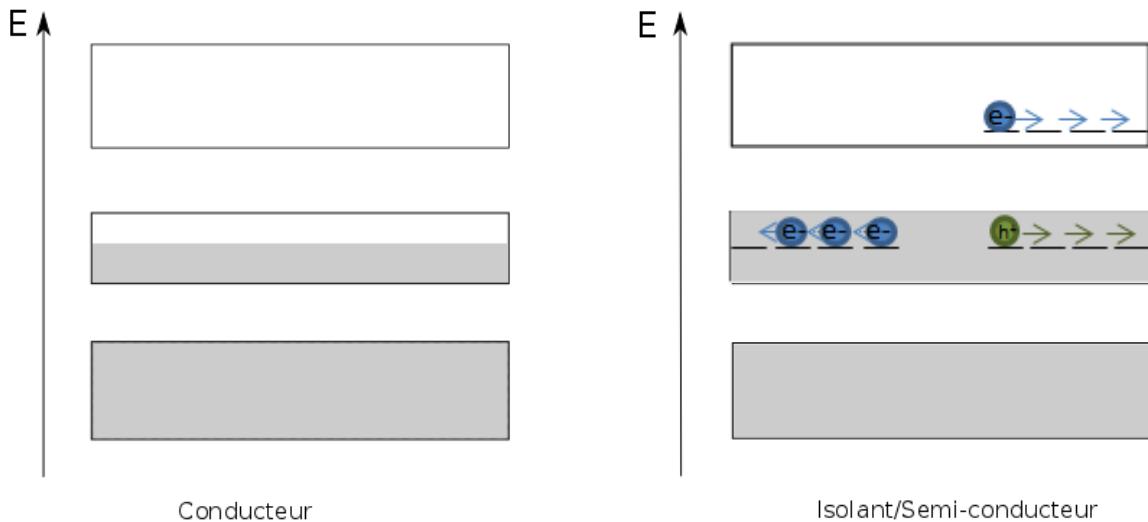
### 1.2.2. The different types of materials

The energy levels of an extended and continuous material are determined by band theory. It predicts that the energy of an electron within a solid can only be within certain continuous intervals of values, or « permitted bands ». It follows that there are energy intervals within which no electrons of the material are found. In this case, we are talking about a “band gap”. This is illustrated in Figure 1.



**Figure 1** Structure de bande d'un matériau

Among the different types of materials we can find the conductors. These materials have a band structure such that in the ground state, the highest occupied electronic levels are within a band. As a result, the electrons of these levels can move freely within the material under the effect of an electric field. By contrast, there are insulating and semiconductor materials, for which the highest occupied electronic level has an energy located exactly at the upper limit of a permitted band. Therefore there is no free level within the band, and

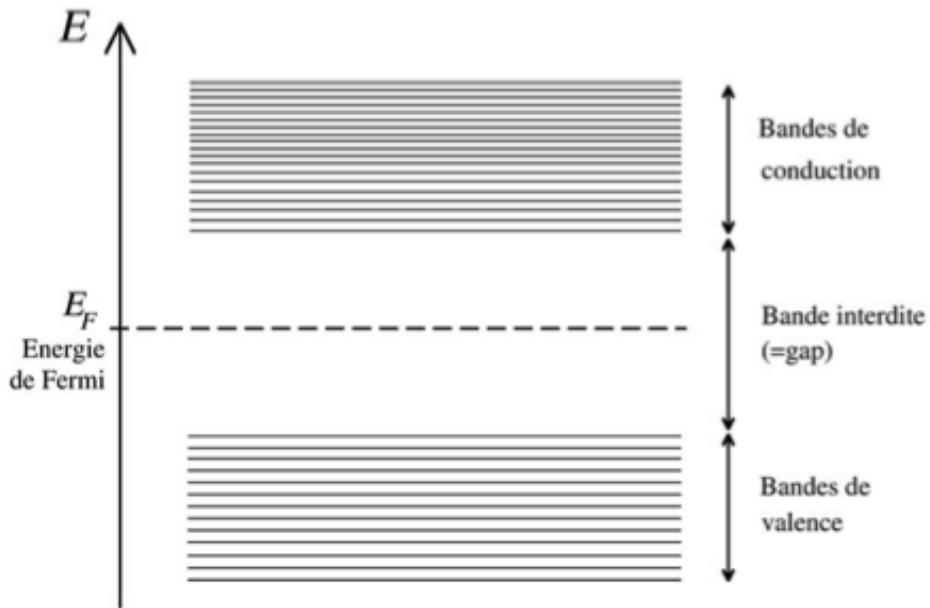


**Figure 2** Allure des niveaux électroniques d'un matériau conducteur et d'un matériau isolant, ou semi-conducteur. Les niveaux grisés sont les niveaux occupés dans l'état fondamental. Le transport de charges dans un semi-conducteur est représenté schématiquement.

electrons cannot move through the material under the effect of an electric field. The electronic levels of these two materials are shown in Figure 2.

Semiconductor is when it is possible to add charge carriers from the highest occupied band, called valence band (EVB), to the lowest unoccupied band, called conduction band (ECB). In the case of the conduction band, the charge carriers are electrons since they can move through the empty band because most of the energy levels accessible to  $RT$  are unoccupied. On the other hand, electrons in the valence band cannot move, the surrounding energy levels being already occupied by other electrons. For this reason, a charge carrier in the valence band is defined as an empty state, i.e., a lack of electron. By simplification, these empty states in the valence band are considered as quasi-particles called «hole».

There are two ways to obtain a semiconductor instead of an insulator: 1) when the energy difference between the upper limit of the valence band (EVB), and the lower limit of the conduction band (ECB), is low enough that it is possible to directly excite an electron from one band to another (by illumination or thermally) or 2) by doping (see below). So it's a relative concept. The band gap between the valence band and the conduction band of a semiconductor is usually called the band gap ( $E_g$ ). Finally, a last interesting parameter of semiconductors is their Fermi level ( $E_F$ ), which corresponds to the maximum energy that an electron can theoretically reach in the material at ground state and at 0K.  $E_F$  is also defined as the energy level where the probability that a site is occupied by an electron is equal to 1/2. Thus, the Fermi level is proportional to the amount of electrons present in the semiconductor. For a non-doped (or intrinsic) semiconductor, it is exactly in the middle of the band gap. The semiconductor nomenclature is summarized in Figure 3.

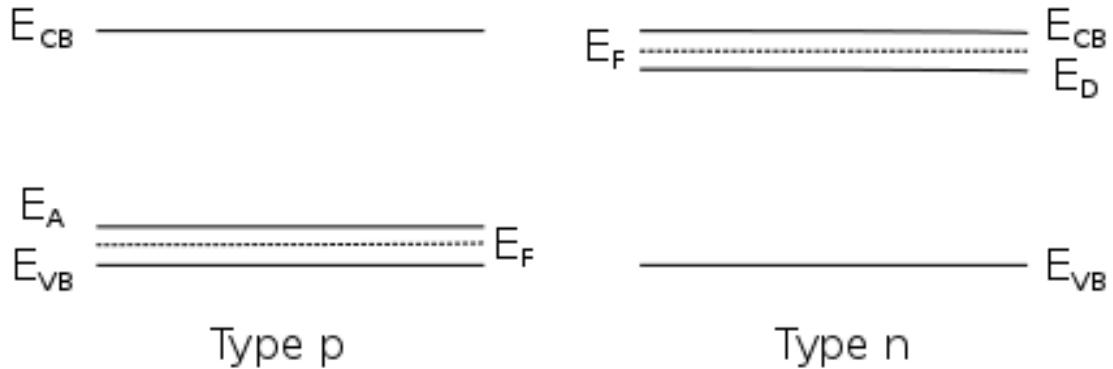


**Figure 3** Structure électronique d'un semi-conducteur.

Thus, when providing the semiconductor with an energy higher than that of the band gap (typically by illuminating it at a wavelength lower than that corresponding to the band gap energy), it is possible to promote an electron directly from the valence band to the conduction band. An electron/hole pair is thus created, with an electron free to move in the conduction band, and a hole free to move in the valence band. The material thus becomes conductive and the created charges can be used to feed an external charge. The semiconductor currently most used in photovoltaic technology is silicon.

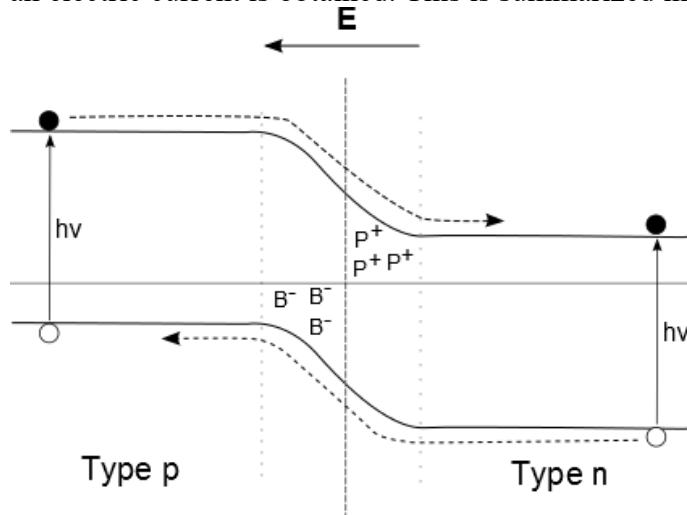
#### 1.2.3. The p-n junction and the photovoltaic cell

When designing a semiconductor, an important parameter is doping. It is a question of introducing in tiny proportions an impurity that will «boost» the conductivity of the semiconductor. In the case of silicon, it can be doped with phosphorus atoms or boron atoms. Phosphorus, by replacing silicon atoms, will bring an excess of electrons in the conduction band by oxidizing ( $P \rightarrow P^+$ ), we speak of doping type n. On the contrary adding boron produces an electron deficit in the valence band by reducing ( $B \rightarrow B^-$ ). This is called p-type doping. In both cases, dopant injects charge carriers (electrons for type n and holes for type p) into the semiconductor. In both cases, the fixed charge on the dopant is compensated by a free charge (hole or electron) in the semiconductor. Doping also changes the position of the Fermi level, which is proportional to the number of electrons present in the semiconductor. The strip diagrams for both types of semiconductors are shown in Figure 4.

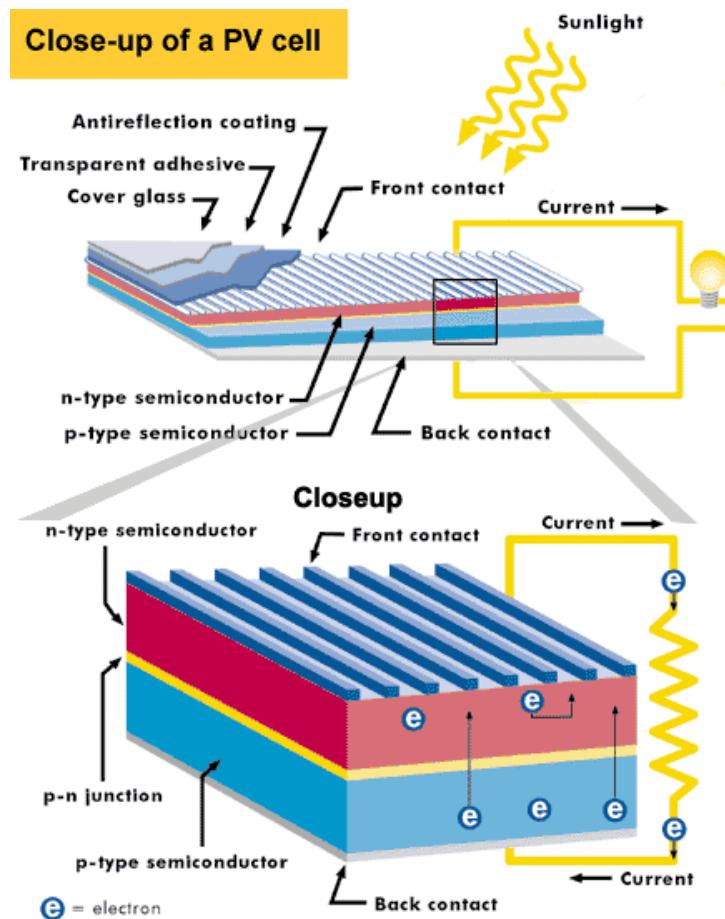


**Figure 4** Diagramme de bandes de semi-conducteurs dopés

When a p-type semiconductor and a n-type semiconductor are brought into contact, a p-n junction is created. When in contact, electrons diffuse from the n-type material with an excess of electrons to the p-type material with an electron deficiency. This diffusion process continues until the Fermi levels of the two materials are equal. We are then in equilibrium. However, the diffusion of the free charges leaves the dopant atoms close to the non neutralized junction, locally breaking the electro-neutrality. These generate a field within the junction. It follows that the respective positions of the energy bands are modified and a diode structure is obtained, with an electric field internal to the material, and the electrons promoted in the conduction band tend to be attracted to the n-type zone, lower in energy, while the holes in the conduction band are attracted to the p-type zone. A diode structure is obtained. Thus when the junction is illuminated, the photons communicate their energy to the electrons, electron-hole pairs are created, the charges are separated by the electric field, and an electric current is obtained. This is summarized in Figure 5.



**Figure 5** Diagramme énergétique d'une jonction p-n

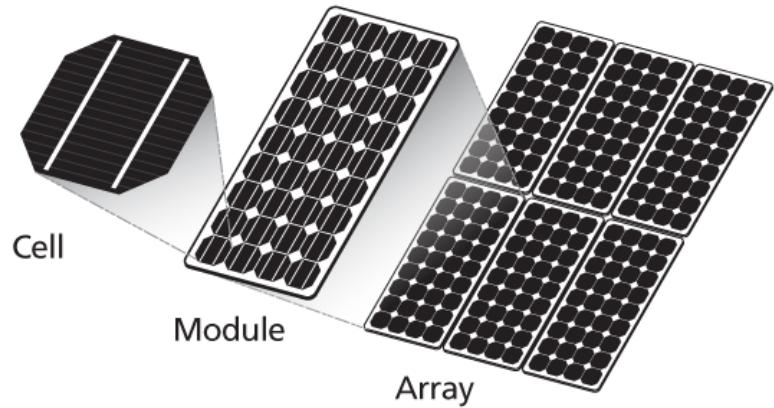


**Figure 6** Différentes épaisseurs de matériau présentes dans une cellule photovoltaïque. Le schéma du bas est un agrandissement de la partie permettant de produire du courant électrique à partir d'énergie solaire

In practice, metal contacts are available on both sides of the junction, in order to collect electrical currents. Generally a conductive contact sheet is deposited on the underside and edges of the upper (illuminated) side of the cell. Then, a conductive wire mesh is laid on the upper side, so as to collect the current, while letting light through. The optimization of the spacing of conductive fibers in the mesh of the wire mesh is a question of compromise between maximization of electrical conductance, and minimization of light blocking. In addition, other elements are added when building cells to improve their properties. For example, the outer side of the cell is provided with an anti-reflective layer, so that maximum light is absorbed by the cell. A protective glass is also used, applied with a transparent adhesive to ensure the mechanical protection of the cell.

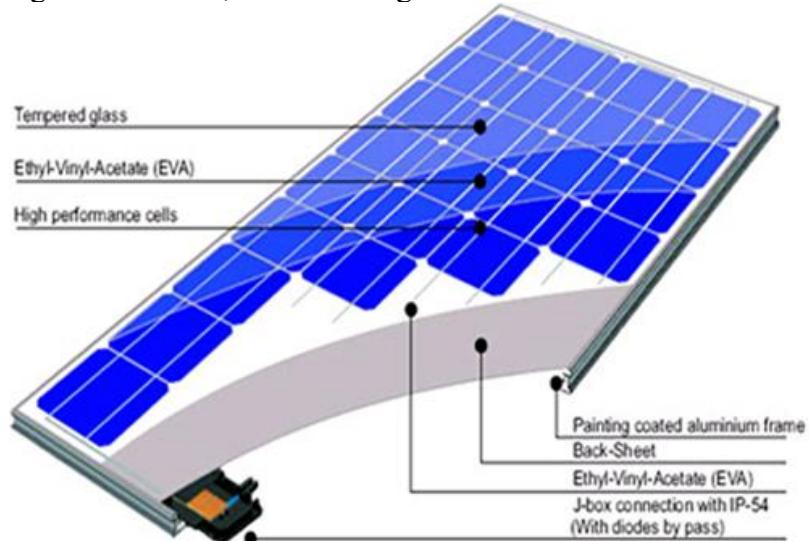
#### 1.2.4. Solar module and solar panel

The photovoltaic cell described above is the basic unit of a photovoltaic system. As a rule, the cell measures a few square centimeters and generates about 1 Watt of power. In order to generate a higher power, several cells are connected in series and in parallel on a module of about 0.5 to 1 m<sup>2</sup>.



**Figure 7** Les différentes unités d'un panneau solaire photovoltaïque

Different modules are then connected electrically in series and in parallel to form a solar panel, which generates the desired current and voltage. Figure 8 shows the construction of a solar module supported by a frame, which can be fixed on a support or structure. The modules can be assembled in many different configurations. For example, they can be mounted on a support specifically adapted to the installation on the roof of a building. With the recent developments of amorphous silicon panels, photovoltaic sheets can even be used directly as shingles in the roof, thus reducing material and labour costs.

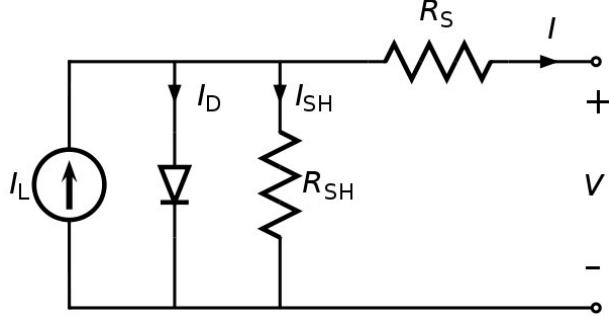


**Figure 8** Composition d'un module solaire

## 1.3. Electrical characterization of a photovoltaic system

### 1.3.1 Equivalent electrical circuit

The photovoltaic cell is generally represented by the following electrical circuit:



It contains the following parameters. The output current  $I$  is equal to the current generated by the illumination (or photo-current)  $I_L$ , minus the diode current  $I_D$  and the leakage current  $I_{SH}$ .

$$I = I_L - I_D - I_{SH}$$

The resistance in series  $R_S$  represents the internal resistance of the cell, and depends in particular on the depth of the p-n junction, impurities and contact resistance. The shunt resistance  $R_{SH}$  is inversely proportional to the ground leakage current. In an ideal photovoltaic cell,  $R_S = 0$  and  $R_{SH} = \infty$ . In fact, in a silicon cell of very good quality, and one square inch ( $6.45 \text{ cm}^2$ ), we typically have  $R_S = 0.05 - 0.10 \text{ Ohms}$  et  $R_{SH} = 200 - 300 \text{ Ohms}$ . Cell efficiency is sensitive to small variations in  $R_S$ , but is generally insensitive to changes in  $R_{SH}$ . The voltage created through the diode and shunt  $V_j$  and defined by:

$$V_j = V + IR_S$$

The Schottky equation for the diode then gives:

$$I_D = I_0 \exp\left(\frac{qV_j}{nkT} - 1\right)$$

Where  $I_0$  is the reverse saturation current of the diode,  $q$  is the elementary charge ( $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ),  $n$  is the diode ideality factor ( $n = 1$  for an ideal diode),  $k$  is the Boltzmann constant ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ), and  $T$  is the temperature (in K).

Therefore, the output current is given by:

$$I = I_L - I_0 \exp\left(\frac{q(V + IR_S)}{nkT} - 1\right) - \frac{V + IR_S}{R_{SH}}$$

The last term, the ground leakage current, is low compared to  $I_L$  and  $I_D$ , and can usually be

overlooked. We can therefore determine the reverse saturation current of the diode by placing at zero current (open circuit,  $I = 0$ ) and in the dark ( $I_L = 0$ ). The diode input voltage and current are then measured to determine the diode reverse saturation current.

### 1.3.2 Open circuit voltage and short-circuit current

Two important parameters to describe the electrical performance of the photovoltaic cell are the open circuit voltage  $V_{OC}$  and short-circuit current  $I_{SC}$ . The latter is measured by short-circuiting the output terminals and under full illumination of the cell. If low diode and ground leakage currents are neglected under these conditions ( $R_S$  is small and  $R_{SH}$  high), the short-circuit current is the photocurrent  $I_L$ :

$$I_{SC} = I_L$$

The maximum photoelectric voltage is produced in an open circuit, at  $I = 0$ . Again, by neglecting ground leakage, the result is:

$$V_{OC} = \frac{n k T}{q} \ln \left( \frac{I_L}{I_0} + 1 \right)$$

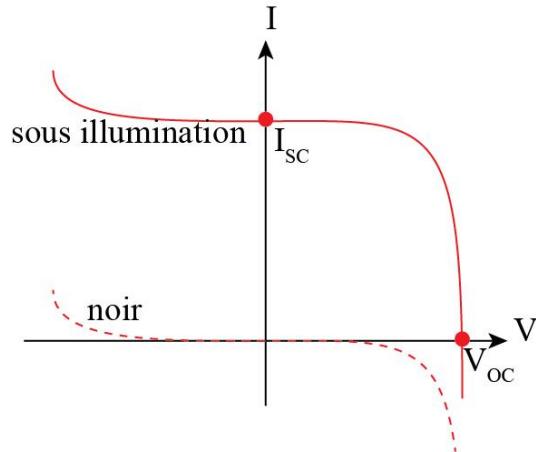
Where the constant  $kT/q$  is the absolute temperature expressed as a voltage (300K corresponding to 0.026V). In practice, the photo-current  $I_L$  of a photovoltaic cell is several orders of magnitude higher than the reverse saturation current  $I_0$ . Therefore  $V_{OC}$  is much higher than  $kT/q$ .

Under constant illumination,  $I_L/I_0$  depends relatively strongly on temperature, and there is a decrease in the open circuit voltage with an increase in the cell temperature.

### 1.3.3 Curves I-V and P-V

The electrical characteristic of the photovoltaic cell is usually presented in the form of an intensity-voltage curve (or I-V curve). The shape of this curve in the dark and under illumination is shown in Figure 9. At zero voltage, the short-circuit current is obtained  $I_{SC}$ , at the top left of the positive voltage frame when a cell is lit. At zero current the maximum voltage is found  $V_{OC}$ , at the bottom right of the diagram.

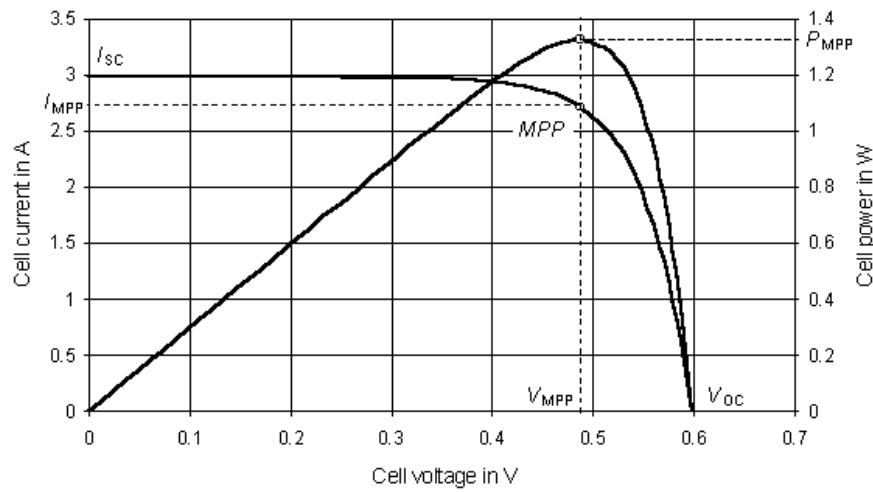
In the right hatched area, the current decreases rapidly when the voltage is increased. The cell then behaves as a constant voltage source with internal resistance. In the left hatched region, the cell functions as a constant current source, generating a voltage corresponding to the load resistance. Between these two regions, we observe an elbow.



**Figure 9** Courbes I-V, dans le noir et sous illumination, d'une cellule photovoltaïque

If a negative voltage is applied to the cell, the current remains constant and the power supplied is absorbed by the cell. However, beyond a certain value, the junction breaks and the current increases rapidly. We are talking about breakdown voltage. Its value is the same whether one is in darkness or under illumination.

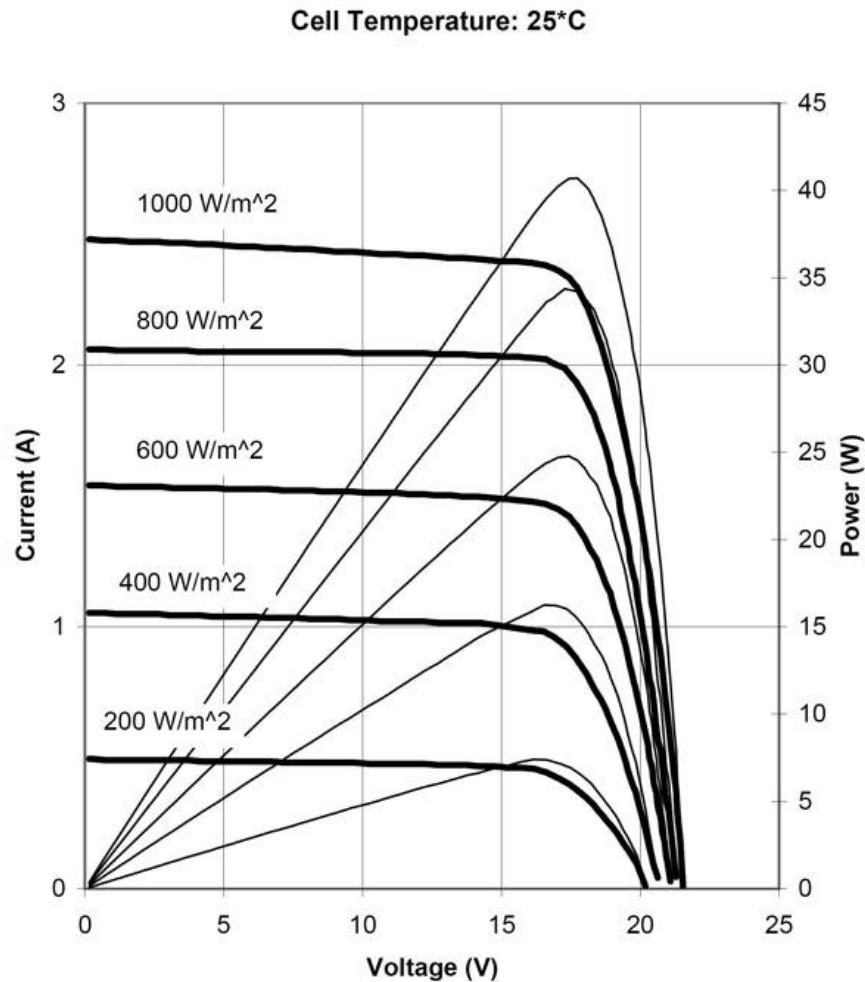
The power delivered by the cell corresponds to the product of the output voltage by the output current. Figure 10 shows a power-voltage (P-V) characteristic of the cell. We observe that the power is zero in open-circuit and during a short-circuit. The maximum power is obtained at the elbow of the I-V curve. Therefore, the photovoltaic modules are designed to operate in conditions close to this elbow. In practice, we are slightly to the left of the elbow, where the panel behaves as a constant current source.



**Figure 10** Courbe P-V d'une cellule photovoltaïque sous illumination

Figure 11 shows the I-V characteristics of a 40W panel under four different solar illuminance intensities: 1000 W/m<sup>2</sup> to 200 W/m<sup>2</sup>. These curves are recorded under an air mass (AM) of 1.5. A zero air mass (AM0) represents the conditions of the space vacuum,

where the solar radiation is  $1350 \text{ W/m}^2$ . AM1 represents ideal terrestrial conditions, in an environment where the air is clean and when the sun's rays suffer the least resistance before reaching the Earth's surface. Taking into account the average humidity and pollution present in everyday air, we find ourselves in AM1.5 conditions, which we use as a reference.



**Figure 11** Courbes I-V obtenues pour un panneau solaire de 40W à différentes illuminations.

The solar power in normal incidence on a surface in AM1.5 conditions, on a sunny day, is approximately  $1000 \text{ W/m}^2$ . In cloudy weather, the light intensity decreases and the value of  $500 \text{ W/m}^2$  in industry to report curves I-V.

#### 1.3.4. Efficiency and Filling Factor

The conversion efficiency of a photovoltaic cell is defined by:

$$\eta = \frac{\text{electrical output power}}{\text{solar power irradiating the cell}}$$

The filling factor (FF) is the ratio between the maximum power (obtained at the peak of the P-V curve or at the elbow of the I-V curve) and the product of  $I_{SC}$  by  $V_{OC}$ :

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{SC}V_{OC}} = \frac{I_{\max}V_{\max}}{I_{SC}V_{OC}}$$

The fill factor determines the quality of an I-V characteristic. Its value is greater than 0.7 for good cells. Resistances  $R_s$  and  $R_{SH}$  cause a decrease in this fill factor. This factor is a useful parameter used in solar panel quality checks.

## 2. Experimental procedure

Before starting the TP:

- Turn on the DC interface and module, and computer
- Lower the curtains around the solar lamp-panel module
- Do not look lamps, when turned on, without goggles.
- Launch the EESFC program located on the computer desktop
- Caution: when the lamps are turned off, it is necessary to wait for them to cool sufficiently before being able to turn them on again

The assembly consists of two crystalline silicon solar panels of  $0.512 \text{ m}^2$  can be connected in series or in parallel. These panels can be illuminated by five lamps each (SUN-1 and SUN-2). The illumination intensity can be varied by selecting different positions for these two parameters in the software. Each of the modules can be illuminated independently.

The characteristics of the direct current from the panels can be measured in the «DC Load» module. Voltage and current values are displayed in the software (V-DC and I-DC). The panels can be connected to lamps, a dimmer, or an engine in this module.

From this module, one can power a battery, or turn the direct current into alternating current to power lamps or a motor in the module «AC Load». This module will not be studied in the TP.

The radiation power density can be measured with the SRL sensor. The value is displayed in  $\text{W/m}^2$  in the software.

Before clicking START, check the following parameters:

- The rheostat must be set to a different value from the maximum or minimum (in the middle is fine)
- Panels must be configured in parallel
- The measurement must be done before the regulator
- Current and voltage must be measured on solar panel 2

To obtain the I - V curve of a panel, follow the following procedure:

Click on START to launch the program

Turn on the maximum lighting on the solar panel 2 (SUN-2) and turn on the fans. This panel is chosen because the temperature stabilizes faster closer to the fans.

Wait for the solar panel temperature to stabilize (it usually takes 15-20 minutes).

Once the temperature is constant, select position 2 to power the rheostat (“Rheostat” switch on and “Lamps” switch on).

Draw the I-V curve of the panel, using the program, from this configuration.

**Note:** To draw the curve using the program, the parameters measured by the interface can be recorded at a desired frequency. To do this, simply click on «Save Data». To observe and trace the recorded data, click on «Quit» then on «View data». However, this will have the effect of turning off the lamps, and it will be necessary to wait until they cool before being able to turn them back on.

This procedure can be repeated under different conditions to study the influence of certain factors on panel performance.

# **Report**

A company contacts you to equip itself with solar panels. Before doing business with you, she asks you to send her the characteristics of your product.

1. Plot the I-V and P-V characteristic of the solar panel to the maximum available light intensity, without forgetting to specify the temperature at which it was measured.
2. Give the value of the parameters of interest ( $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , FF, Eta) to characterize your solar panel and indicate, if possible, their position on the curves.
3. Calculate the efficiency of your solar panel at the measurement temperature.

The company tells you that it wants to use solar panels on two sites in different regions. It therefore asks you if the performance of your product varies with their location.

4. What are the two main factors that can influence the performance of a solar panel depending on their location? (light intensity, temperature)
5. Graphically show the evolution of the I-V curve of the solar panel according to each of these factors (gather the curves on a graph for each parameter).
6. Plot the evolution of the parameters of interest and the efficiency of the solar panel according to these two parameters.
7. Try to explain the cause or causes of variations caused by light intensity (and temperature (bonus)) from a fundamental point of view (i.e. based on the theory of bands and the formation of a p-n junction, also the equations).
8. Propose and justify optimal geographical locations for the use of solar panels.

# **Structure**

- 8- Abstract (main result and short conclusion)
- 9- Introduction (theory)
- 10- Experimental section (experimental setup and procedure)
- 11- Results and discussion
- 12- Conclusions
- 13- References
- 14- Appendix (if necessary)

- **Read the protocol before the laboratory, student's preparation will be considered for the final grades**
- **Some question will be asked during the laboratory**
- **Answer all the questions in the protocol and follow the structure like it's a scientific paper – use references (papers, website) and cite them. It will be checked if they exist.**
- **Don't use chatgpt to write your report, or use it to find references or explanations. Points will be substracted if we find out that it was written by AI.**