

TDM - Les cellules photovoltaïques

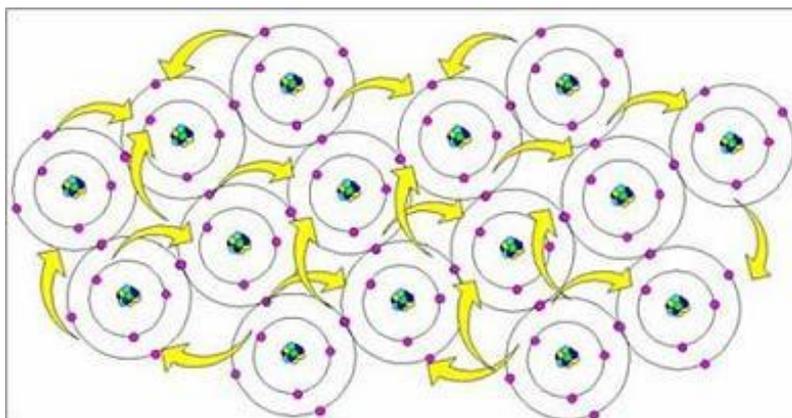
Principe de fonctionnement ;

Conductivité des métaux :

Modèle de Sommerfeld ;

L'atome de métal, comme tous les autres atomes, est constitué d'un noyau et d'électrons. Les électrons sont répartis autour du noyau qui exerce une force électrique sur eux afin de les attirer vers lui et les électrons possèdent une vitesse suffisamment grande que pour ne pas chuter vers le noyau.

Les électrons se répartissent en couche autour du noyau, dès qu'une couche est complète une nouvelle se forme mais elle se situe plus loin du noyau, elle subit donc une force d'attraction de la part du noyau moins grande. La dernière couche ou encore orbitale est nommée couche de valence, la



force électrique qu'exerce le noyau sur cette couche est tellement faible que les électrons qui s'y trouvent peuvent se détacher de l'atome afin de se lier à un autre, on dit que ces électrons sont des électrons libres.

Source : <http://formation.xpair.com/diagnostics-immobilier/lire/conductivite-electrique.htm>

La conductivité électrique des métaux ayant une faible résistivité¹ à température ambiante, de l'ordre de $10^{-5} \Omega \text{cm}$, leur provient de leurs électrons libres qui interagissent avec les atomes voisins. Lorsqu'on applique, à un métal, un champ électrique supérieur à celui que les noyaux exercent sur les électrons, cela aura pour conséquence de les exciter, et ils vont donc se déplacer dans le matériau en se heurtant, se liant aux atomes de celui-ci. Et c'est ce déplacement d'électrons qui constitue le courant électrique.

¹ Correspond à la capacité d'un matériau à s'opposer à la circulation du courant électrique (<https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistivité>)

Loi d'ohm ;

La loi d'ohm est loi physique qu'on applique dans le domaine électrique car elle met en relation résistance d'un conducteur, le courant qui le traverse et la tension aux bornes de celui-ci.

The diagram shows the equation $U = R \times I$ in large red letters. Three blue arrows point from descriptive text to the variables: one from 'Tension aux bornes du conducteur: en Volts (V)' to 'U', one from 'Résistance du conducteur: en Ohms (Ω)' to 'R', and one from 'Intensité du courant traversant le conducteur: en Ampères (A)' to 'I'.

Source ; <http://www.web-sciences.com/ohms/ohm1.php>

Annexe 1

La Résistivité :

La résistance d'un fil ou encore coefficient de résistivité (ρ) désigne l'aptitude d'un matériau à conduire l'électricité. Elle dépend de la nature du fil et elle inversement proportionnelle à sa section et directement proportionnelle à sa longueur. En effet, plus un fil est long, plus les électrons auront de difficultés à se « faufiler » entre les atomes du fil car les chocs entre les électrons et les atomes ou même les électrons entre eux seront plus nombreux donc la résistance sera plus grande dans un fil long que dans un fil court. Cependant, si on augmente la section du fil la résistivité de celui-ci sera plus faible car les électrons auront plus de place pour se déplacer et les chocs entre eux et les atomes sont moins fréquents. Donc, plus le fil est gros plus la résistance du fil est faible.

La loi de Pouillet

La loi de Pouillet est une formule qui traduit la résistance d'un corps. Elle est la suivante :

$$R = \rho \cdot l / s$$

*Où l est la longueur de la section exprimée en mètres,
 R est la résistance exprimée en Ohms (Ω),
 ρ la résistivité exprimée en $\Omega.m$ (ohms par mètre)
et s la section en m^2 .*

Source ; <http://fr.audiofanzine.com/connectique/editorial/dossiers/les-liaisons-audio-analogiques-intro.html>

Mouvement ondulatoire de l'électron :

Le modèle de Sommerfeld ne s'applique que dans les conducteurs. En effet, l'interaction entre les atomes et le déplacement des électrons entre 2 chocs ne s'applique que dans les conducteurs car dans les électrons et les semi-conducteurs, les électrons décrivent un module ondulatoire.

En effet, les électrons se comportent soit COMME des particules ou COMME une onde, et parfois comme les 2. Cependant, on ignore la nature du mouvement ondulatoire de l'électrons mais on arrive tout de même à calculer l'onde et à prévoir le comportement de l'électrons. Le comportement de l'onde peut être prévu grâce à l'interprétation physique suivante ; « l'intensité de ces ondes est égale à la densité de probabilité de trouver l'électrons à un endroit donné. »²

Dans un milieu « vide » on peut donner l'expression suivante à la longueur de l'onde, lambda

$$\Lambda = h/p$$

Où : h est la constante de Plank ($6,62 \cdot 10^{-34} \text{J/s}$)
p est le moment cinétique de l'électron ($=m \cdot v$)

Si l'électron se trouve dans un corps, qu'elle n'est pas dans le vide, son potentiel électrique est donc produit par d'autre charge. Ce potentiel est à l'origine de la longueur d'onde donc elle dépend lui. Dans ce cas, c'est l'équation de Schrödinger qui va nous donner la fonction de l'onde que décrit l'électron.

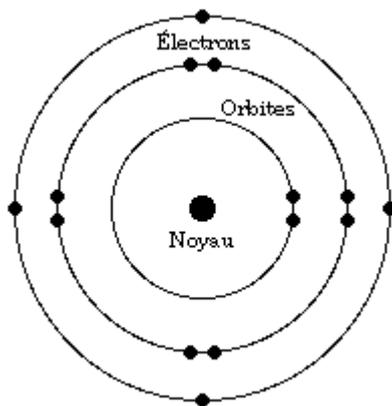
$$\Delta^2 \psi = (4\pi^2 m/h^2) V \psi + 2jm(\partial \psi / \partial t) = 0$$

² LPFR, Semiconducteurs , 1990 , 36pages

Les matériaux semi-conducteurs :

Les semi-conducteurs sont des matériaux se situant entre les conducteurs et les isolant, c'est-à-dire qu'ils ont une résistance plus élevée que les conducteurs métalliques mais plus faible que celle des isolants. Dans le cas des cellules photovoltaïques, c'est le silicium qui est le plus souvent utilisé comme semi-conducteurs.

Atome de silicium :



Ici on peut voir que le silicium comme tous les semi-conducteurs à quatre électrons sur sa couche extérieure, on dira alors que sa valence est de 4.

Ces 4 électrons de valence peuvent former des liaisons covalentes avec les atomes voisins.

Niveau de Fermi :

Ici, nous allons voir comment les niveaux d'énergie sont occupés en fonction des changements de température, pour les électrons.

Premièrement qu'est-ce que la température ?

La température désigne le niveau d'agitation des atomes (électrons), plus le corps est chaud, plus ses atomes vibrent et plus l'amplitude d'écartement par rapport à la position moyenne est grande.

On peut décrire l'énergie des électrons libre grâce à la formule suivante :

$$E = \frac{3}{2} kT$$

Où E=L'énergie (Joules)

K=La constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

T=La température (Kelvin)

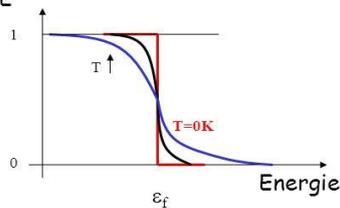
Ensuite, nous savons qu'un système tend toujours vers sa position d'équilibre, là où il utilise le moins d'énergie donc les atomes et leurs électrons vont tendre à une position où leurs énergies potentielles sont moindres. De plus, plus leur énergie est faible, plus les atomes, leur énergie se tasse, donc à une température de 0K les atomes.

Enfin, Dans un solide froid, les électrons se tassent d'énergie et occupent les bandes d'énergie les plus basses. Cependant, si on chauffe le solide, il va se remplir d'énergie et donc les molécules vont s'agiter et donc occuper les bandes d'énergie plus haute. La probabilité que les atomes occupent des couches plus haute furent étudié par Fermi qui montra que ; (voir formule à coté)



Distribution de Fermi-Dirac

Probabilité d'occupation du niveau d'énergie E



$$F(e) = \frac{1}{1 + \exp[(\varepsilon - \varepsilon_f) / kT]}$$

Niveau de Fermi ε_f caractéristique du solide

Où : $F(e)$ = La probabilité d'occuper les couches d'énergies

E = l'énergie du niveau

E_f = l'énergie du niveau de fermi

K et T : constante de Boltzmann et la température.

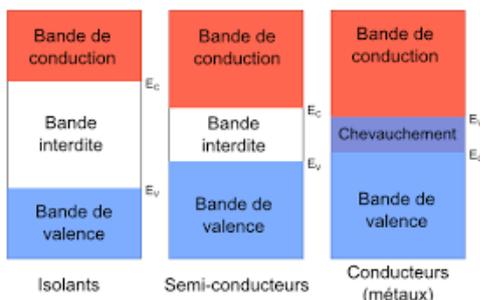
Le niveau de Fermi est le niveau où les molécules sont aux « repos », le niveau le plus haut qu'elles occupent dans les bandes à 0°k.

Les semi-conducteur de type intrinsèque ;

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur qui n'a pas été dopée c'est-à-dire qu'il n'a pas d'atome étranger, ils sont pur.

Les semi-conducteurs à 0°k ne sont pas conducteur car d'électricité car leur bande de valence est vide et celle de conduction, donc les atomes sont tassés. Mais si on augmente la température, les électrons des atomes dans la bande de valence vont s'agiter et vont « migrer » vers la bande conduction. Mais les électrons qui ont quittés la bande de valences ont laissé des « trous » ces trous comme les électrons dans la bande de conduction sont conducteurs donc la conductivité du semi-conducteurs est proportionnels à la concentration des trous, et des électrons dans la bande de conduction. C'est pourquoi plus on chauffe un

semi-conducteurs intrinsèque, plus sa conductivité augmente.



La bande interdite correspond à l'énergie nécessaire pour que les électrons puissent passer de la bande de valence à la bande de conduction.

Les semi-conducteurs extrinsèques

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur auquel on a injecté des impuretés en quantité contrôlée, dès lors on dit qu'il a été dopé. Cependant, les atomes qu'on a ajoutés au cristallin et le cristallin en lui-même n'ont pas le même niveau d'énergie, ce qui va créer une différence de potentiel.

On distingue 2 types « d'impuretés » qui dopent les semi-conducteurs :

- Les **donneurs** qui ont un niveau d'énergie proche de la bande de conduction mais toujours dans la bande interdite. Lorsqu'on chauffe les atomes donneurs, ils montent presque tous dans la bande de conduction.
- Les **accepteurs**, qui eux créent des états vides juste au-dessus de la bande de valence, ces états seront occupés par des électrons lorsqu'on aura chauffé les atomes, ce qui va créer des trous dans la bande de valence et qui vont permettre la conduction électrique.

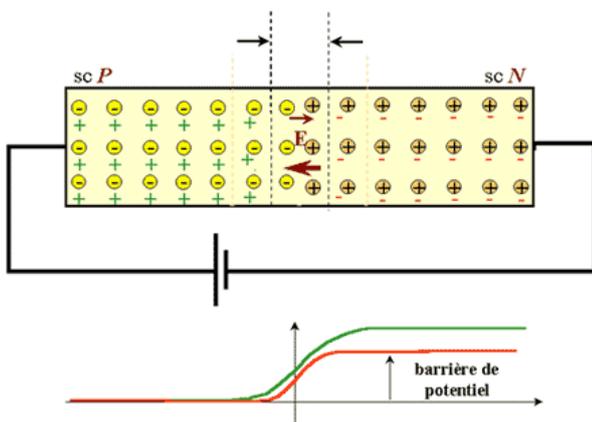
Dopage de type N (donneurs) :

Le dopage de type N consiste à introduire un atome de la 5^{ème} colonne du tableau de Mendeleïev,

le plus souvent on utilise le phosphore comme impureté car comme il est pentavalent et donc 4 de ses électrons vont assurer les liaisons avec les atomes de silicium voisin et il restera un électron de valence libre.

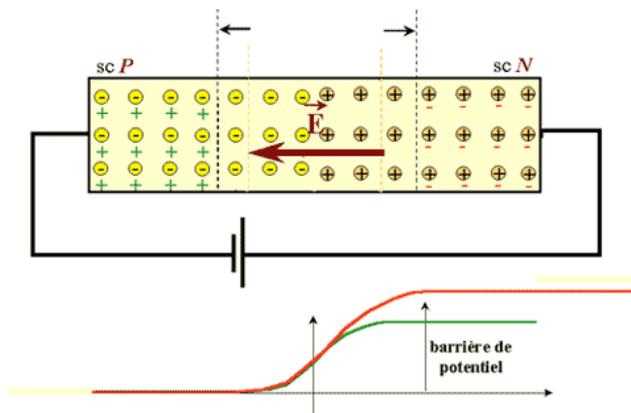
Cette électron va être excité grâce à l'énergie thermique, il pourra donc plus aisément passer dans la bande de conduction donc grâce à ces impuretés, le taux de conductivité électrique du matériau va augmenter. De plus, lorsqu'on va chauffer le matériau, les électrons excédentaires des atomes

pentavalents vont passer dans la bande de conduction et donc les atomes seront de charges positives. Dans ce type de dopage, on dit que **les électrons sont les porteurs majoritaires**.



Dopage de type P (accepteurs) :

Le dopage de type P consiste à introduire dans les atomes de silicium qui est un atome de la



IVème colonne un atome de la IIIème colonne comme le bore. Le fait qu'on introduit un atome de bore va faire qu'il aura une liaison de libre, ce qui va former un trou et cela qu'a des conditions de température basse.

A température élevée, l'énergie thermique va permettre le transfert d'un électron d'un atome de silicium voisin vers celui du Bore,

ce qui va charger négativement l'atome de Bore car il aura un électron en plus.

En considérant le taux de dopage, on constate que le nombre de trous est plus élevé que celui du cristal pur. Les trous vont assurer la conduction électrique du dopage de type P.

Calculs de la concentration des électrons :

$$n = N_c \cdot e^{E_f/KT}$$

où

- n est la concentration d'électrons dans la bande de conduction
- N_c est un coefficient qui dépend du matériau
- E_f est mesuré à partir de la bande de conduction (toujours négatif)
- K et T sont les constantes de Boltzmann

Calculs de la concentration des électrons :

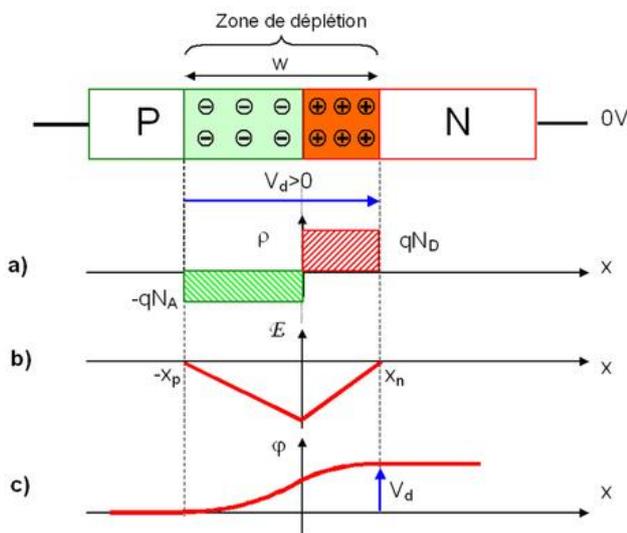
$$p = N_v \cdot e^{-(E_f + E_g)/KT}$$

où

- p est la concentration des trous dans la bande de conduction
- N_e est un coefficient qui dépend du matériau
- E_f est mesuré à partir de la bande de conduction (toujours négatif)
- K et T sont les constantes de Boltzmann
- ΔE (ΔE) est la largeur de la bande interdite (1,1 eV pour le silicium)

La jonction PN ;

Quand un dopage P et un Dopage N d'un même cristal sont mis côte à côte, cela forme une jonction



PN. A l'endroit où les 2 dopage se touchent, des trous du dosage P vont passer dans la zone N et les électrons du Dopage N vont passer dans la Zone P, à cette jonction, les électrons et les trous se combinent entre eux et se neutralisent c'est la zone de déplétion. La différence de densité du donneur et du receveur va passer d'une charge négative pour la zone P à une charge positive pour la zone N. Dans cette zone chargée électriquement, il ne reste plus que des ions, qui vont empêcher les autres charges libres dans la zone P et N de se recombiner car ils ne pourront pas traverser cette zone de déplétion, qui est isolante.

Cas 1 ;

Si on applique à cette diode une différence de potentielle V continue avec la borne positive du générateur reliée à la zone P et la borne négatif à la zone N, la diode est dite en « polarisation directe ».

Dans le cas où on applique une tension continue aux bornes, il se crée un champ électrique. Or dans la jonction PN il y a des particules (trous, électrons), ces particules, vont se déplacer selon la loi :

$$\vec{F}_e = q\vec{E}$$

Donc, Elles vont suivre le champ électrique qui est orienté du + vers le -.

C'est pourquoi les trous vont se déplacer vers la zone N en traversant la jonction PN et les électrons vont de déplacer vers la zone P en traversant aussi la jonction PN. Le fait qu'elles traversent cette jonction va générer un courant électrique de quelque mA.

De plus, le champ crée par le générateur(externe) et le champ crée par la jonction PN(interne) s'opposent, donc dès que le champ externe va être plus élevée que le champs interne, un courant qui grâce aux mouvement des électrons et trous va se produire

Dans cette situation le champ externe créé par le générateur s'oppose au champ interne. Dès que le champ externe dépasse le champ interne, un courant des majoritaires s'établit à travers la jonction. Il existe pour une jonction P-N une tension de seuil qui est caractéristique du matériau :

Cas 2 :

Si on applique à cette diode une différence de potentielle continue avec la borne positive du générateur reliée à la zone N et la borne négatif du générateur reliée la zone P, la diode est dite en « polarisation inverse »

Dans le cas où on applique une tension continue aux bornes à ce montage un courant électrique sera créé mais il sera tellement faible, qu'il est négligeable.

En effet, le champ électrique se déplacent du + vers le -, les trous et les électrons ne vont pas traverser la jonction PN mais ils iront en sens inverses de celle-ci, donc aucun courant ne vas circuler.

Claquage inverse de Zener ;

Si une diode est dopée fortement et que la zone de déplétion est mince, le champ électrique va alors couper les liaisons covalentes et donc une coupure du passage des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction. Le courant inverse va alors augmenter de manière considérable mais les effets sont non destructifs et réversibles. De plus, la résistance dynamique après le claquage est faible. Cependant, si on augmente l'épaisseur de la zone de déplétion, on augmentera donc aussi la valeur de la tension (tension de Zener) à laquelle se produit le claquage.

Ex ;

Si on a une diode très dopé la tension de claquage est de V pour un champ de 2.10^7 V/cm

Limites de l'utilisation des diodes ;

La puissance ; La diode va dissiper de l'énergie qui va provoquer un échauffement de celle-ci par l'effet joule. Il faut donc veiller à ce que la température ne dépasse pas une valeur limite, qui est propre à chaque matériau, afin que le courant inverse soit toujours en dessous de sa valeur maximale.

Ex ; Pour le silicium la température maximum est de 185°C

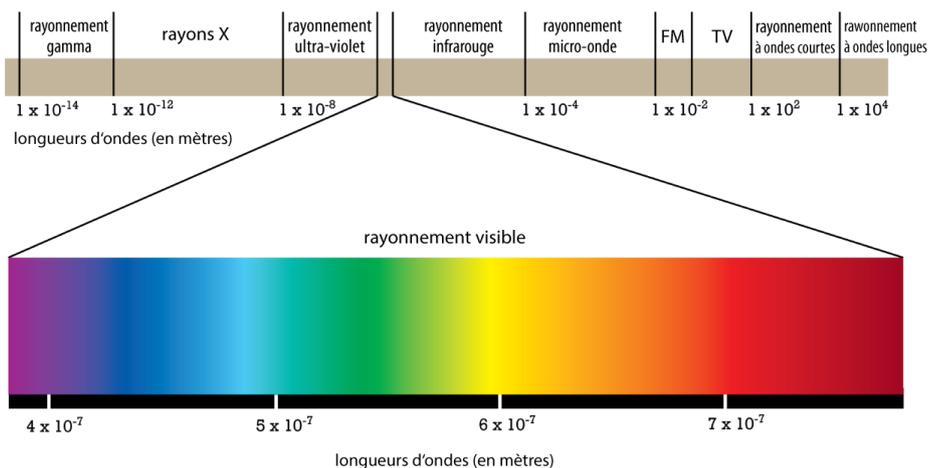
La **tension** de claquage doit toujours être supérieure à la tension inverse.

Ex ; Moins on dope une diode plus sa tenue en tension inverse est bonne, c'est le cas des diodes de redressement.

Le **courant** maximum que la diode peut accepter, dépend de sa capacité à dissiper l'énergie, la puissance qu'elle engendre. Le courant direct maximum varie en fonction de la surface de la jonction.

Effet voltaïque :

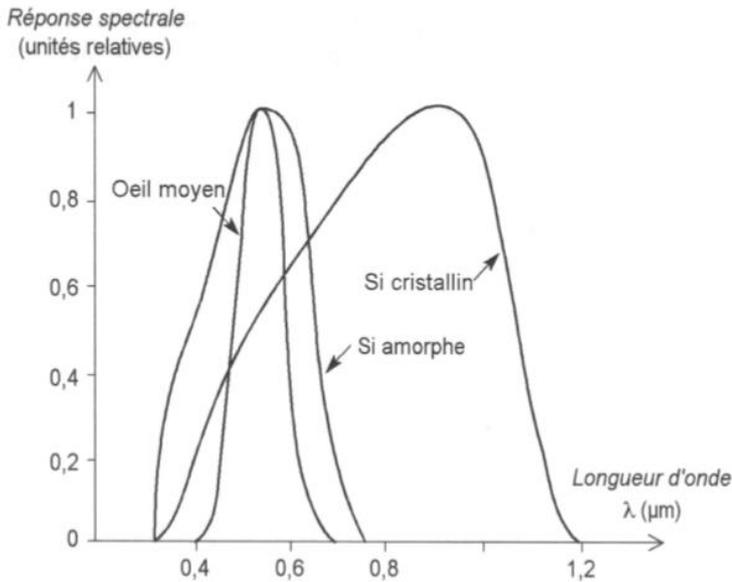
On sait que la lumière que le soleil dégage est constituée de photon, particule principale du rayonnement électromagnétique, qui dégagent de l'énergie et dont la longueur d'onde est



inversement proportionnelle à l'énergie. C'est grâce à ses longueurs d'onde que l'on arrive à former le spectre électromagnétique.

Source ; <http://www.pion.cz/fr/article/?catID=33>

Le rayonnement qu'émet le soleil à une longueur d'onde qui s'étend de 200 nano mètre, qui correspond à l'ultraviolet, à 2500 nano mètre, qui correspond à l'infrarouge. Or, l'œil humain lui est sensible qu'à des ondes qui ont une longueur entre 300 et 800 nanomètre, on appelle cette partie le domaine du visible.



Nous pouvons corréliser l'œil humain et les cellules photovoltaïques car comme notre œil elles ne sont

sensibles qu'à une partie des ondes du spectre électromagnétique, du rayonnement émis par le soleil et cette sensibilité dépend du matériau utilisé.

Dans le schéma suivant, nous pouvons voir la comparaison entre les réponses spectrales de l'œil au silicium amorphe et du silicium cristallin.

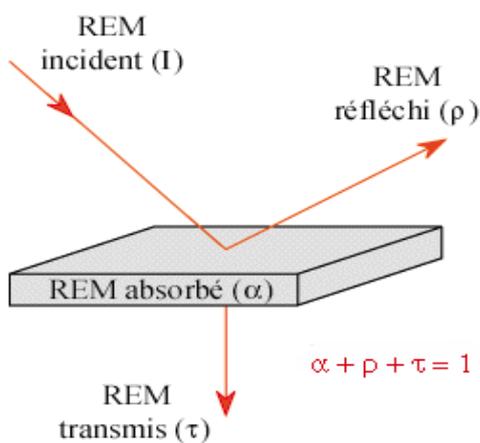
Nous observons que le silicium amorphe et l'œil humain ont un maximum de

sensibilité plus ou moins identiques alors que celui du silicium cristallin est beaucoup plus décalé.

Source image ; <http://www.photovoltaique.info/L-effet-photovoltaïque.html>

Comment ça marche ?

Comme vu plus haut, les rayons solaires sont composés de photons qui contiennent de l'énergie. De plus, on sait que la cellule photovoltaïque est une diode, dont une couche est dopée en N et l'autre



en P au contact de ses 2 couches se forme un champ électrique dans la cellule. Donc pour que la lumière du soleil puisse être transformée en énergie électrique, il faut que le matériau puisse ABSORBER cette lumière et qui minimise les pertes dues à la réflexion ou à la transmission (de la lumière). De plus, afin d'améliorer le rendement des cellules photovoltaïques, on insère une électrode arrière qui est réfléchissante afin de permettre un 2ème passage dans les couches actives du matériau.

Source ; <http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/rayonnement/2-rayonnement-matiere/2-1-interaction-rayonnement-matiere.html>

On peut calculer l'énergie absorbée à la profondeur d grâce à l'équation suivante ;

$$E = E_{inc}e^{-\alpha d}$$

On peut voir que l'énergie subit une loi exponentielle décroissante car plus on pénètre dans le matériau plus la part de lumière à absorber est petite.

On peut aussi calculer l'énergie absorbée dans l'épaisseur grâce à l'équation suivante ;

$$E_{abs} = E_{inc} \cdot (1 - e^{-\alpha d})$$

Où : α est le coefficient d'absorption, il dépend du matériau et de la longueur de l'onde de l'énergie incidente (pour le Silicium cristallin = $4,5 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$ et pour le Si amorphe = $2,4 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$).

De l'énergie des photons à l'énergie électrique :

On peut expliquer le passage de l'énergie des photons à l'énergie électrique grâce au phénomène physique de **photoconductivité**.

Les cellules photovoltaïques vont absorber les photons, qui vont transmettre leur énergie aux électrons des atomes. Or comme vu précédemment, si on arrive à transmettre une énergie suffisante aux électrons de la dernière couche des atomes, la force d'attractions du noyau étant inférieure à cette énergie, ils vont pouvoir se détacher de l'atome. Les électrons libres, qui se sont détachés du noyau et qui sont porteurs d'une charge négative, vont laisser place à un trou qui est porteur d'une charge positive.

Les électrons libres vont se déplacer d'atome en atomes afin de combler les trous formés dans ceux-ci. On va donc grâce à ce processus pouvoir générer un courant électrique car les charges négatives se déplacent dans un sens (charges négatives) et les trous dans l'autre sens (charges positives).

« L'analogie la plus simple est celle dite des « places de parking ». Prenons un automobiliste qui quitte sa place de parking pour une autre, qui lui convient mieux. Une autre voiture va faire de même et venir prendre la place qu'il a libérée, laissant à nouveau une place libre qui pourra être prise par une troisième voiture, etc. Quand on imagine la scène, on voit bien un « courant de voitures » dans un sens (les électrons) et un « courant de places » dans l'autre sens (les trous).

Source ; <http://fr.calameo.com/read/004600489632bc6b307e1>

C'est ici qu'intervient le Gap car c'est lui qui va déterminer si le photon a assez d'énergie que pour pouvoir faire déplacer l'électrons de son atome. En effet, si les photons ont une énergie supérieure au seuil du gap (donc une longueur d'onde plus petite) alors la conversion photovoltaïque va pouvoir s'effectuer.

Les différents types de cellules :

Cellules de la première génération : cellules cristallines :

Les cellules de la première génération ont comme principal composant le silicium et ne contiennent qu'une jonction PN. Elles sont produites en « wafers »³ grâce à du silicium très pur mais leur production est à ce jour très coûteuse et consomme beaucoup d'énergie.

On distingue 2 types de cellules cristallines :

Les cellules monocristallines



Lorsque le silicium est refroidi et donc se solidifie en ne formant qu'un cristal, on découpe de fines lamelles, tranches de ce cristal et qui ont une couleur bleue foncée uniforme.

Avantages	Inconvénients	Rendement
<ul style="list-style-type: none">- Très bon rendement (150 Wc/m²)	<ul style="list-style-type: none">- Si l'éclairage, le rayonnement est faible, le rendement est très faible.	<ul style="list-style-type: none">- Rendement du dispositif commercial entre 12-19 % (soit une puissance de 120 à 190 Wc par m²).
<ul style="list-style-type: none">- Durée de vie de plus ou moins 30ans	<ul style="list-style-type: none">- coût élevé	<ul style="list-style-type: none">- En laboratoire le rendement maximale atteint est de 25%

³ En électronique et micro-électronique, un wafer (de l'anglais) est une tranche, une galette ou une plaque de semi-conducteur.(wiki)

Les cellules polycristallins

Durant le refroidissement du silicium en fusion qui a été coulé dans des creuset à fond plat, il se forme des cristaux différents qui vont donner au panneaux photovoltaïques une couleur bleu foncé mais cette fois ci irrégulière



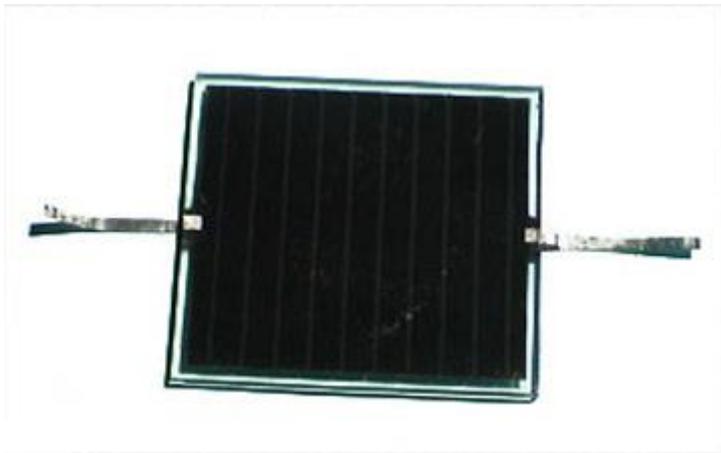
Avantages	Inconvénients	Rendements
<ul style="list-style-type: none">- Bon rendement (100 Wc/m²)	<ul style="list-style-type: none">- Si l'éclairage, le rayonnement est faible, le rendement est très faible.	<ul style="list-style-type: none">- Rendement du dispositif commercial entre 11-15 % (110 à 150 Wc/m²)
<ul style="list-style-type: none">- Meilleur rapport qualité/prix que le monocristallins		<ul style="list-style-type: none">- En laboratoire le rendement maximale atteint est de 20%
<ul style="list-style-type: none">- Durée de vie de plus ou moins 30ans		

Cellules de la 2^{ème} génération : couches minces

Dans les cellules de la 2^{ème} génération, les semi-conducteur qui peuvent être le silicium amorphe, le tellure de cadmium sont posé sur un support souvent en verre par vaporisation. Ces cellules sont souvent utilisées dans les montres, calculatrices ... On y retrouve aussi des cellules sans silicium .

CIS (sans silicium)

Se présentant sous la forme de minces couches malléable les cellules CIS partie de la nouvelle génération. On dit que ces cellules sont de type cuivre-indium-sélénium d'où le CIS, on remarque donc que dans ces cellules, on « s'affranchie » du silicium. Les composants de la cellule CIS sont plus



faciles à trouver que le silicium des monocristallin. De plus, elles sont capables de transformer un spectre lumineux plus larges que les monocristallins, d'où leur utilisation fréquente en temps nuageux ou à l'intérieur des maisons.

Avantages	Inconvénients	Rendements
<ul style="list-style-type: none">- Rendement plus élevé que les autres cellules en couches minces	<ul style="list-style-type: none">- Pour atteindre un rendement égale à celui des cellules épaisse , il faut une grande superficie	<ul style="list-style-type: none">- Rendement du dispositif commercial entre 9-11 %
<ul style="list-style-type: none">- Flexible, souple	<ul style="list-style-type: none">- Performance diminue fortement avec le temps	<ul style="list-style-type: none">- En laboratoire le rendement maximale atteint est de 19.3%
<ul style="list-style-type: none">- Fabriqué sans silicium		
<ul style="list-style-type: none">- Ne sont pas toxique		

Cellules Silicium amorphe

Sur une feuille de verre, on met du gaz issu de la transformation du silicium, d'où la couleur marronne de ces cellules.



Avantages	Inconvénients	Rendements
<ul style="list-style-type: none">- Fonctionne avec un éclairage faible	<ul style="list-style-type: none">- Rendement plus faible au soleil	<ul style="list-style-type: none">- Rendement du dispositif commercial entre 5-9 %
<ul style="list-style-type: none">- Plus résistant à la température élevée	<ul style="list-style-type: none">- Nécessite une surface plus grande pour atteindre le rendement des cellules épaisses	<ul style="list-style-type: none">- En laboratoire le rendement maximal atteint est de 13,4%
<ul style="list-style-type: none">- Bon marché	<ul style="list-style-type: none">- Courte durée de vie (10ans)	
<ul style="list-style-type: none">- Souple, flexible	<ul style="list-style-type: none">- Performance diminue avec le temps	

