

I. La conversion solaire photovoltaïque

Le mot « photovoltaïque » vient du grec « phôtos » qui signifie lumière et de « Volta » du nom du physicien italien qui, en 1800, découvrit la pile électrique. Mais c'est le savant français Antoine Becquerel qui le premier, en 1839, mit en évidence cette conversion particulière de l'énergie : la variation de la conductivité d'un matériau sous l'effet de la lumière.

- Tout élément photovoltaïque est convertisseur d'énergie qui transforme la lumière en courant électrique.
- un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque.

cette conversion met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

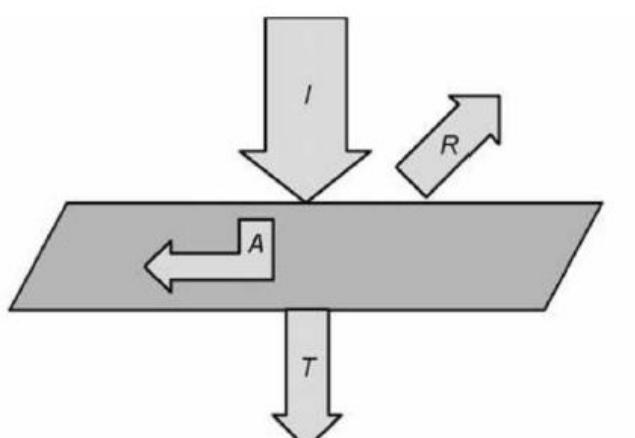
- l'absorption de la lumière dans le matériau,
- le transfert d'énergie des photons aux charges électriques,
- la collecte des charges.

I.1 Absorption de la lumière

la lumière se compose de photons, chacun porteur d'une énergie dépendant de sa longueur d'onde (ou couleur du rayon). Ces photons peuvent pénétrer dans certaines matières, et même passer au travers.

un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir trois événements optiques (figure III.1) :

- **la réflexion** : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet,
- **la transmission** : la lumière traverse l'objet,
- **l'absorption** : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas.



$$I \text{ (flux incident)} = R \text{ (réfléchi)} + A \text{ (absorbé)} + T \text{ (transmis)}$$

Figure III.1 — Réflexion, transmission et absorption.

Ce sont les propriétés optiques du matériau rencontré qui conditionnent la répartition

de ces diverses contributions, en intensité et en longueur d'onde.

a. L'absorption

- Dans la plupart des matériaux, la part absorbée de la lumière est convertie en chaleur (rayonnement IR)
- Dans un matériau photovoltaïque, une partie du flux lumineux absorbé sera restituée sous forme d'énergie électrique.

Quand un matériau absorbe de la lumière, l'énergie restante à la profondeur d s'écrit :

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

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

E_{inc} : Energie incidente

α : Coefficient d'absorption [cm^{-1}]

d [cm]

E_{abs} : Energie absorbée

Matériau	α [cm^{-1}]
Silicium cristallin	$4,5 \cdot 10^3$
Silicium amorphe	$2,4 \cdot 10^4$
Arséniure de gallium	$5,4 \cdot 10^4$

Tableau III.1 — Absorption optique de quelques matériaux photovoltaïques (à 0,59 μm).

Pour améliorer la quantité de lumière absorbée une électrode arrière avec de bonnes propriétés de réflexion (ex: Al), permettra à la lumière de subir un deuxième passage dans les couches actives. La diffusion est aussi un moyen d'améliorer l'absorption :

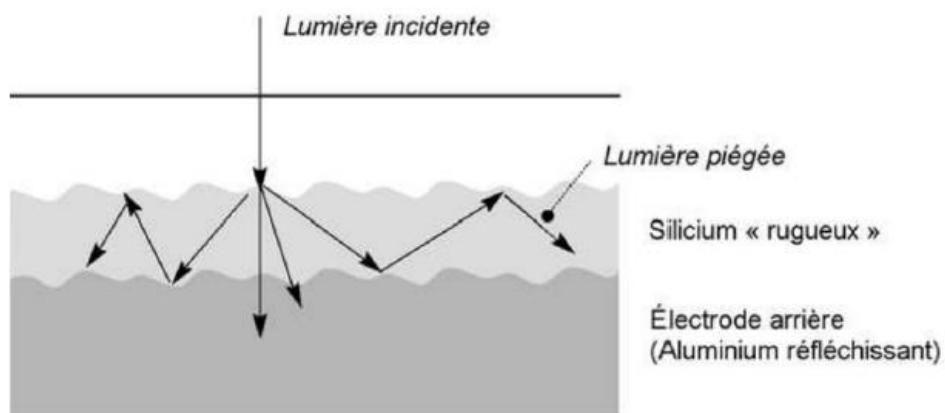


Figure III.2 — Principe du piégeage par diffusion dans une photopile.

b- Transmission

- Silicium cristallin: pas de transmission (épaisseur de silicium 0,2 µm).
- Couche mince, de type silicium amorphe: transmission dans le rouge (épaisseur < 1 µm).

c- Réflexion

La réflexion dépend avant tout des indices de réfraction des matériaux traversés. Plus la différence d'indice est élevée de part et d'autre d'une surface, plus elle est réfléchissante. Le taux de réflexion s'écrit : $R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$ si les matériaux en contact sont d'indice n_1 et n_2 .

Le silicium brut d'indice $n = 3,75$ à $\lambda = 0,6$ pm, en contact avec l'air ($n = 1$) réfléchit 33 % de la lumière qu'il reçoit.

En pratique le silicium n'est pas exposé directement à l'air, comme on le voit sur la figure III.3.

- Pour le silicium cristallin, une couche d'indice intermédiaire est placée sur le Si (oxyde d'indice proche de 2) et dont l'épaisseur est optimisée pour jouer le rôle d'antireflet à une longueur d'onde assez centrale (0,6 µm pour le silicium cristallin).
- Cas du silicium amorphe: L'empilement des indices de réfraction est plus favorable et l'électrode transparente située entre le verre et le silicium joue le rôle d'antireflet dont l'épaisseur est à optimiser pour favoriser l'entrée de la lumière visible dans le silicium amorphe (réponse centrée à 0,5 µm).

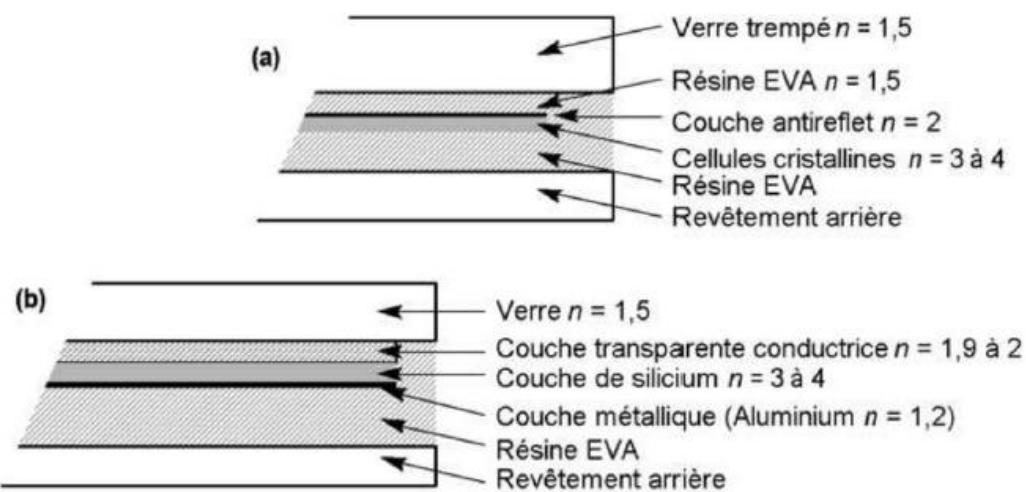


Figure III.3 - Empilements optiques d'une cellule au silicium cristallin (a) et au silicium amorphe (b).

I.2 Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques

Tout solide est en effet constitué d'atomes qui comprennent chacun un noyau (constitué de protons et de neutrons) et un ensemble d'électrons gravitant autour. Les photons absorbés vont

transférer leur énergie aux électrons périphériques des atomes, leur permettant ainsi de se libérer de l'attraction de leur noyau. En régime permanent, l'électron libéré laisse un « trou ». Si cet électron est attiré au dehors, on génère une circulation de charges élémentaires, d'électrons dans un sens, et de trous dans l'autre sens, ce qui donne un courant électrique. Ce phénomène de photoconductivité, est spécifique aux semi-conducteurs car ils comportent des électrons « libérables ».

Dépendant du matériau, il existe un « seuil » d'énergie minimum nécessaire à cette « libération » des électrons par les photons. On appelle ce seuil le gap optique du matériau ou la largeur de bande interdite.

- Le gap optique du silicium cristallin est de $E_g = 1,1$ eV. Sachant que $E = \frac{hc}{\lambda}$, un photon possédant cette énergie a une longueur d'onde $\lambda = 1,13 \mu\text{m}$ (Proche IR).
- Silicium amorphe: $E_g = 1,77$ eV $\Rightarrow \lambda = 700 \text{ nm}$ (Rouge).

Tous les photons d'énergie $> E_g$ ($\lambda < \lambda_g$) sont opérationnels pour la conversion photovoltaïque.

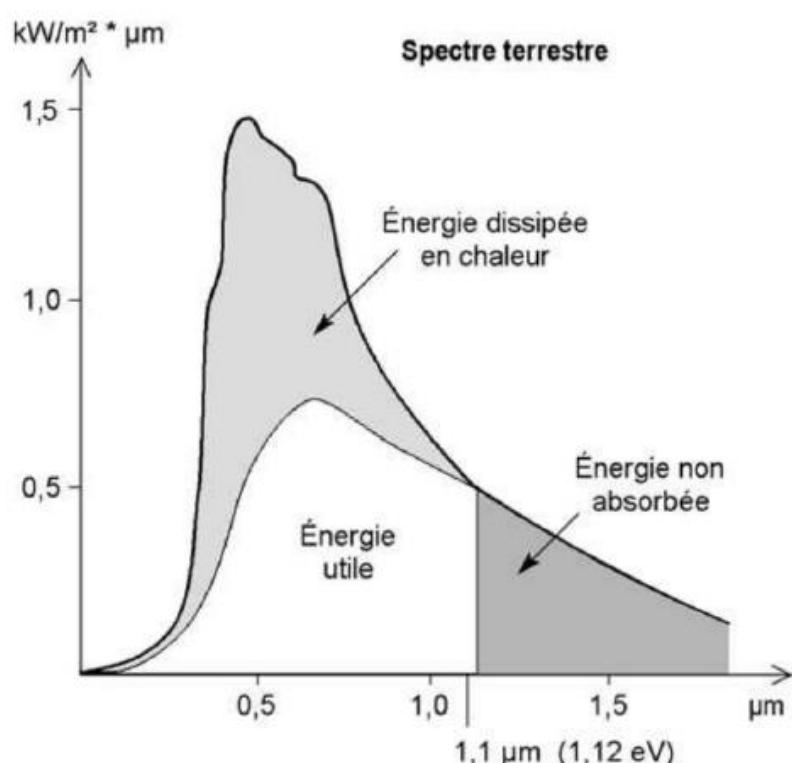


Figure III.4 — Spectre solaire AM0 et portions exploitables par le silicium cristallin.

Le diagramme ci-dessous représente les différents états d'énergie dans le matériau semi-conducteur.

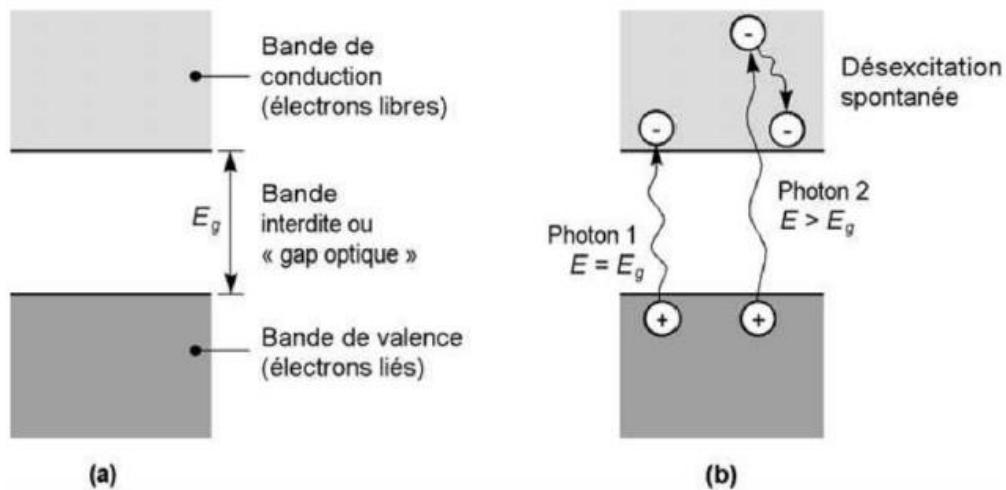


Figure III.5 — Diagramme d'énergie d'un semi-conducteur :a. Dans l'obscurité, b. Sous illumination.

- Chaque photon absorbé ne crée qu'une seule paire électron-trou d'énergie E_g .
- Avec les matériaux photovoltaïques dont on dispose à ce jour, et avec l'énergie lumineuse disponible sur terre, celle du Soleil, il n'est pas possible de convertir plus de 44 % du spectre solaire présent au-dessus de l'atmosphère (voir tableau III.2).

	Silicium cristallin $E_g = 1,1 \text{ eV}$	Arsénure de Gallium $E_g = 1,4 \text{ eV}$
Courant (mA/cm^2)	53,5	39
Puissance (mW/cm^2)	58,8	55
Rendement	0,44	0,41

Tableau III.2 — Performances photovoltaïques théoriques maximales des semi-conducteurs pour un rayonnement AM_0 d'une puissance de $1\ 350 \text{ W/m}^2$.

I.3. La collecte des charges

Pour que les charges libérées par l'illumination soient génératrices d'énergie, il faut qu'elles circulent. L'extraction des charges est réalisée au sein d'une jonction créée volontairement dans le semi-conducteur.

a- Jonction p-n

La jonction d'une photopile au silicium est constituée au moins d'une partie dopée au phosphore (P) (type « n »), accolée à une partie dopée au bore (B) (type « p »). C'est à la frontière de ces deux parties que se crée un champ électrique pour séparer les charges positives et négatives. On

ajoute des contacts électriques pour collecter le courant. Cette jonction a donc les caractéristiques électriques d'une diode au silicium classique avec, sous illumination, apparition d'un photocourant indépendant de la tension et proportionnel au flux lumineux et à la surface de la cellule. cette structure est plus adaptée au silicium cristallin.

b- Jonction p-i-n

La cellule au silicium amorphe classique se compose de trois couches : p — i — n. La couche « **i** » placée au centre du dispositif est la plus épaisse, et sert à la conversion des charges. Les couches **p** et **n** quant à elles permettent la création du champ électrique interne qui s'étend dans toute la couche **i**, ce qui favorise la séparation des charges.