

ARTICLE DE RÉFÉRENCE | Réf : D3942 v1

Cet article est offert jusqu'au 20/02/2026

Le photovoltaïque : fonctionnement d'une cellule, pertes et stratégies pour les limiter

Technologies photovoltaïques - Principes, filières et chaîne de valeur du silicium

Auteur(s) : Pierre-Jean RIBEYRON

Date de publication : 10 nov. 2025 | [Read in English](#)

1. LE PHOTOVOLTAÏQUE : FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE, PERTES ET STRATÉGIES POUR LES LIMITER

La conversion photovoltaïque (ou PV) consiste en la conversion des photons (provenant du soleil) d'énergies suffisantes au regard du semi-conducteur considéré, en paires électron-trou qui sont par la suite collectées par une jonction PN et permettant la génération d'énergie sous forme électrique.

Le composant de base réalisant cette conversion est appelé « cellule photovoltaïque » aux bornes de laquelle une tension et un courant caractéristique du flux lumineux incident peuvent être mesurés.

Le soleil envoie sur la terre une énergie abondante sous forme d'un flux lumineux constitué de différentes longueurs d'ondes, et donc de photons d'énergies très différentes. Cette énergie, envoyée à tout instant, est particulièrement abondante puisqu'elle représente de l'ordre de 10 000 fois la consommation mondiale actuelle d'énergie.

Autrement dit, il faudrait moins d'une heure d'ensoleillement par an pour couvrir les besoins en énergie de l'humanité si on était capable de capter l'entièreté de ce flux.

1.1 Principes de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Nous reprenons ici, des concepts de bases, qui sont par ailleurs très détaillés et approfondis dans l'article ↗ [D 3 935]. Le lecteur intéressé pourra avantageusement s'y reporter.

Nous reprenons certains concepts essentiels parce qu'ils sont indissociables des considérations technologiques que nous allons aborder par la suite.

1.1.1 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque, c'est la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique. Cet effet prend naissance au cœur d'un matériau de type « semi-conducteur » qui est à mi-chemin entre un conducteur électrique et un isolant et qui présente une bande de conduction et de valence de niveau d'énergie différentes, mais relativement proches (voir figure 1 ↗ [D 3 935]).

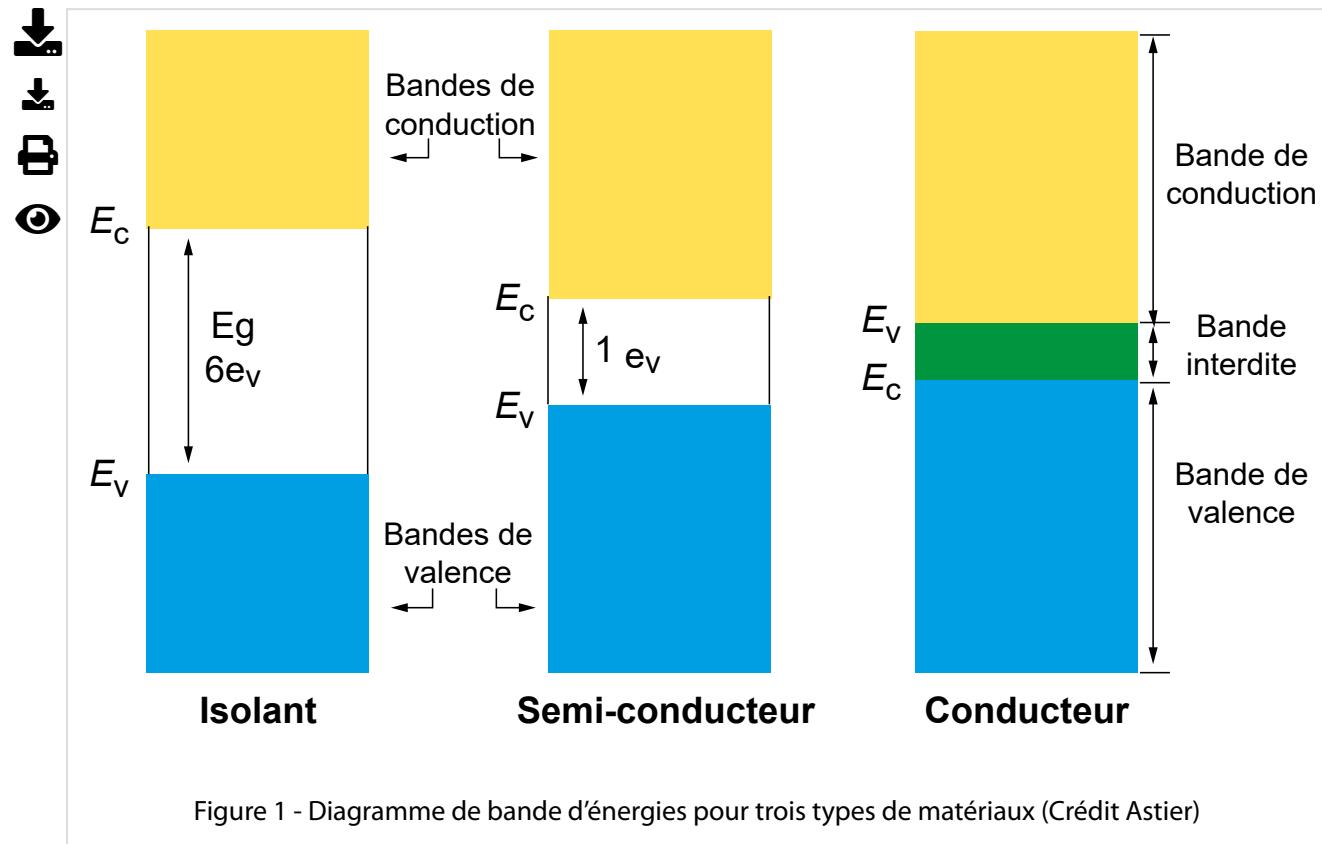


Figure 1 - Diagramme de bande d'énergie pour trois types de matériaux (Crédit Astier)

La différence d'énergie entre ces deux bandes est appelée le « gap » et est spécifique à chaque semi-conducteur.

La valeur du gap est cruciale et va définir la capacité de ce semi-conducteur à absorber des photons de plus ou moins grande énergie, et donc le rendement potentiel de la cellule photovoltaïque vis-à-vis du spectre solaire.

En effet, le spectre solaire présente une grande variation de photons d'énergies et donc de longueurs d'ondes différentes reliés par l'équation (1) :

$$E = h\nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

avec :

- E : énergie du photon (J),
- h : constante de Planck (J · s),
- c : vitesse de la lumière (m/s),
- λ : longueur d'onde du photon considéré (m).



Le rendement maximum théorique d'un semi-conducteur vis-à-vis du spectre solaire est fonction de son gap et a été déterminé par Shokley-Queisser. Elle fait toujours référence de nos jours (figure 2). Les principaux semi-conducteurs utilisés au cours de l'histoire technologique du photovoltaïque y figurent. On notera que le rendement théorique d'une cellule avec un seul semi-conducteur est fixe (c'est le cas du silicium par exemple).

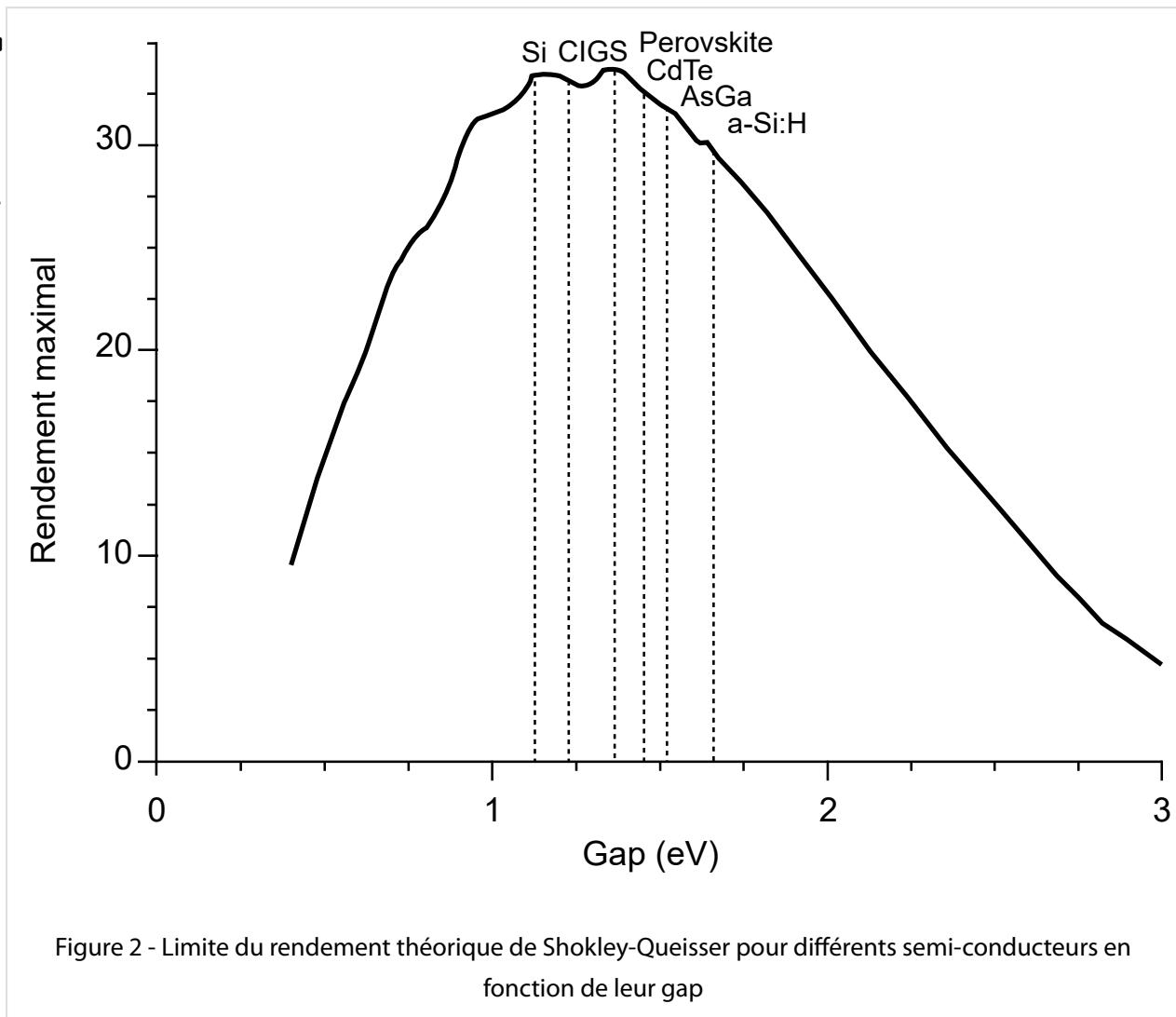


Figure 2 - Limite du rendement théorique de Shokley-Queisser pour différents semi-conducteurs en fonction de leur gap

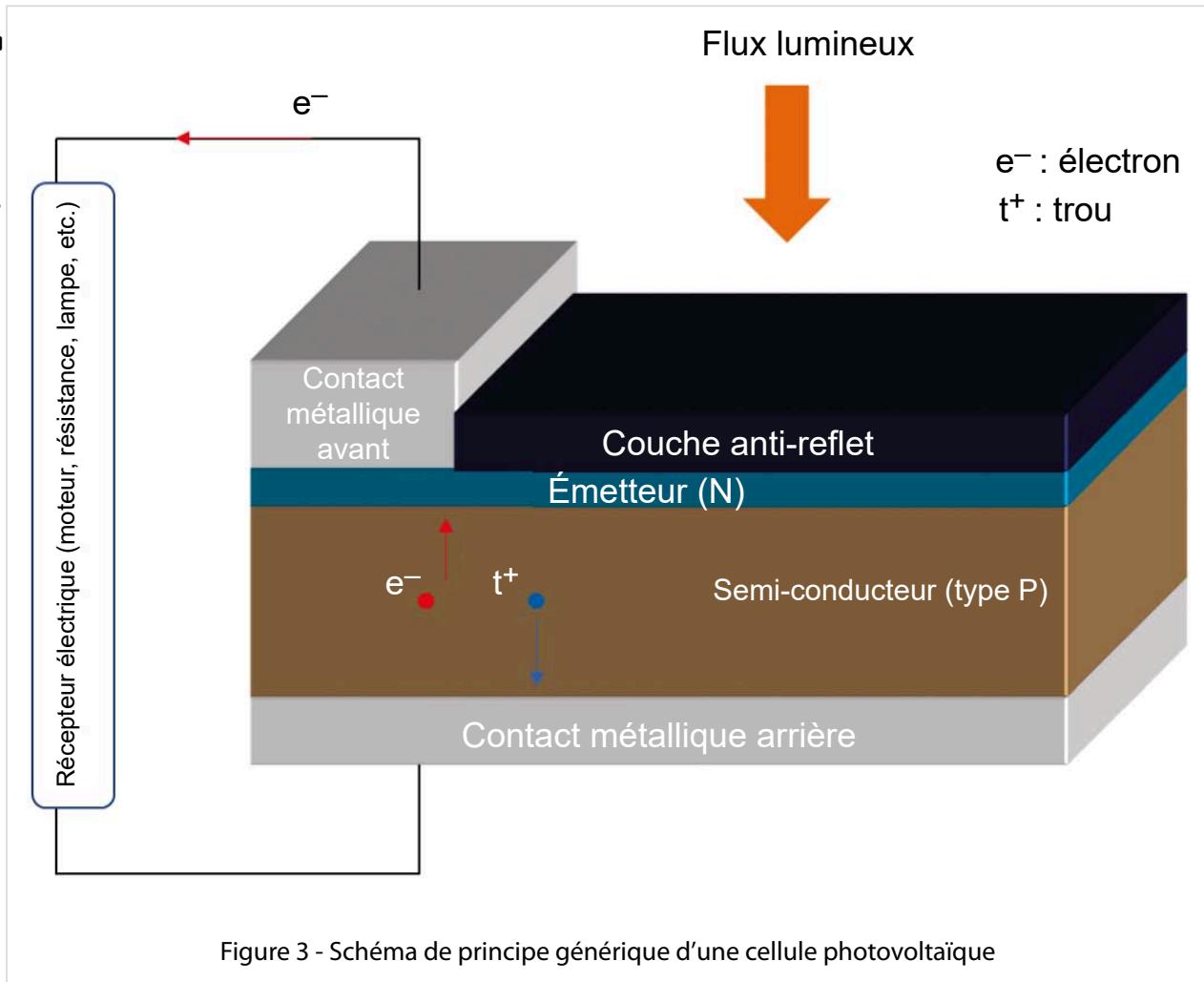
Ce n'est pas le cas des semi-conducteurs comportant plusieurs éléments de stœchiométrie différentes et qui peuvent faire varier leur gap de façon très significative.

Par exemple, celui-ci peut varier de 1,01 eV à 1,68 eV dans le cas du CIGS (composé d'un mélange quaternaire de cuivre, indium, gallium et sélénium). Les perovskites, qu'on décrira plus en détail dans la suite de cet article, ont également cette capacité à faire varier leur gap.

On notera que le rendement théorique dépasse 30 % pour la plupart des semi-conducteurs mentionnés dans cette figure 2 et, pourtant, toutes ces technologies n'ont en réalité pas toutes approché cette valeur. Le gap n'est donc pas le seul critère à prendre en compte pour évaluer le potentiel d'un semi-conducteur.

1.1.2 Schéma et principe de fonctionnement général d'une cellule PV

Une cellule photovoltaïque est constituée d'un semi-conducteur qui va absorber, puis convertir, les photons d'énergies suffisantes en paires électrons trous. Les porteurs minoritaires (électrons dans le cas de la figure 3) vont être collectés par le champs électrique de la jonction formé entre l'émetteur et le semi-conducteur (à l'interface entre la zone N et P). Les porteurs majoritaires (les trous dans le cas de la figure 3) sont collectés par l'autre face vers le contact métallique arrière. L'ensemble permet le passage du courant électrique qui peut alimenter un récepteur électrique.



La figure 4 montre les caractéristiques courant/tension d'une cellule photovoltaïque silicium, mais on retrouve le même type de caractéristiques pour tout type de cellules.

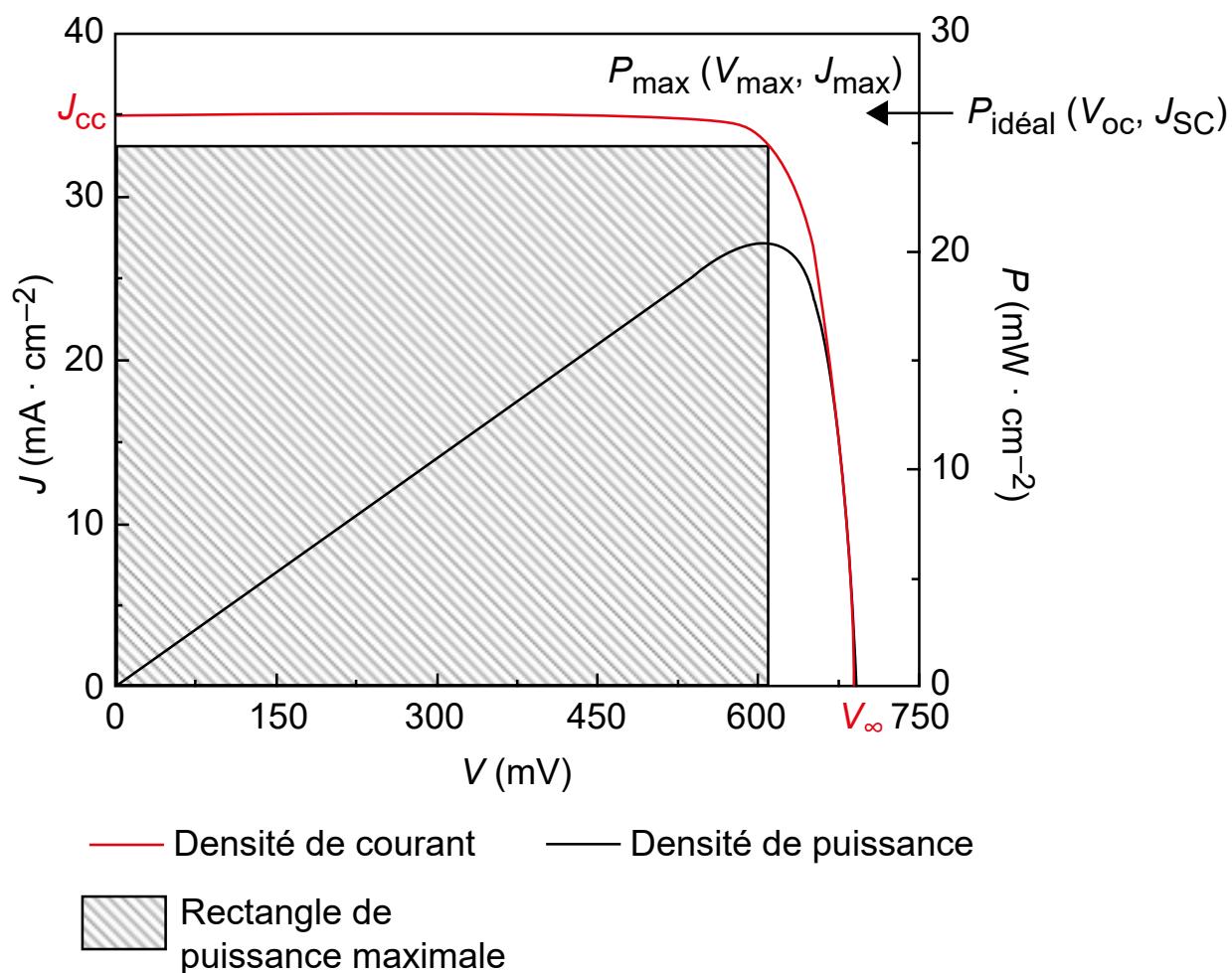


Figure 4 - Caractéristiques courant-tension et puissance d'une cellule photovoltaïque au silicium cristallin sous illumination

La tension de la cellule photovoltaïque est reliée au gap du semi-conducteur considéré, minoré par les différences de potentiels entre le niveau de Fermi et les niveaux de part et d'autre du gap (accepteurs et donneurs). Ainsi, malgré un gap de 1,1 eV, la tension maximale du silicium cristallin se situe autour de 0,75 volts.

Le courant de la cellule est directement lié au rayonnement incident qui contient plus ou moins d'énergie et donc de photons en fonction de chaque longueur d'onde. Tous les photons d'énergies supérieures ou égales au gap sont théoriquement absorbés par le semi-conducteur, si son épaisseur est suffisante, et donnent chacun lieu à la création de paires électron-trou. Le nombre total de paires électrons-trous créés par longueur d'ondes permet de remonter au courant maximum de la cellule. On parle en général en mA/cm^2 .

Pour le silicium, le courant maximal théorique est proche de $42 \text{ mA}/\text{cm}^2$.

Dans cette figure 4, on retrouve les paramètres de base comme la tension de circuit ouvert (V_{oc}) et le courant de court-circuit (J_{cc}) ainsi que le point correspondant au maximum de puissance P_{\max} .

On parle également de facteur de forme (FF) suivant la formule suivante (2) :

$$FF = \frac{V_{\max} \cdot J_{\max}}{V_{oc} \cdot J_{cc}} \quad (2)$$

Ce paramètre évalue le caractère rectangulaire de la courbe courant tension de la cellule par rapport à un rectangle parfait de côté V_{oc} et J_{cc} . En plus des caractéristiques courant/tension, ce paramètre est très utilisé par les technologues pour évaluer la qualité des cellules réalisées car la forme de la courbe et la valeur du FF traduisent, le plus souvent, des problématiques technologiques d'intégration des différentes couches constituant la cellule identifiable sous forme de résistances (résistance série et résistance shunt), ou proviennent de recombinaisons des porteurs au sein du semi-conducteur ou à l'interface des différentes couches constituant la cellule.

1.1.3 Description des principales pertes dans une cellule PV

- **Les pertes énergétiques liées au gap**

Comme le montre la figure 5 pour le silicium cristallin, la première limitation d'une cellule photovoltaïque est liée aux photons réellement utiles pour la conversion.

En effet, les photons dont l'énergie est inférieure au gap du matériau (E_g), zone 1 du schéma de la figure 5), ne peuvent générer de paires électron/trou, et ne sont donc pas absorbés par la cellule photovoltaïque. Ainsi, dans le cas du silicium, tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à 1 250 nm sont perdus et représentent près de 23,5 % de l'énergie totale du spectre.

Les photons dont l'énergie est supérieure à E_g sont absorbés par le matériau, mais l'excès d'énergie ($h\nu - E_g$) est dissipé sous forme de chaleur par les phonons du réseau (zone 2) : ce phénomène s'appelle la « thermalisation ».

Sous un éclairement AM1.5 correspondants au spectre solaire vu à la surface de la terre, cette perte est évaluée à 33 % dans le cas du silicium.

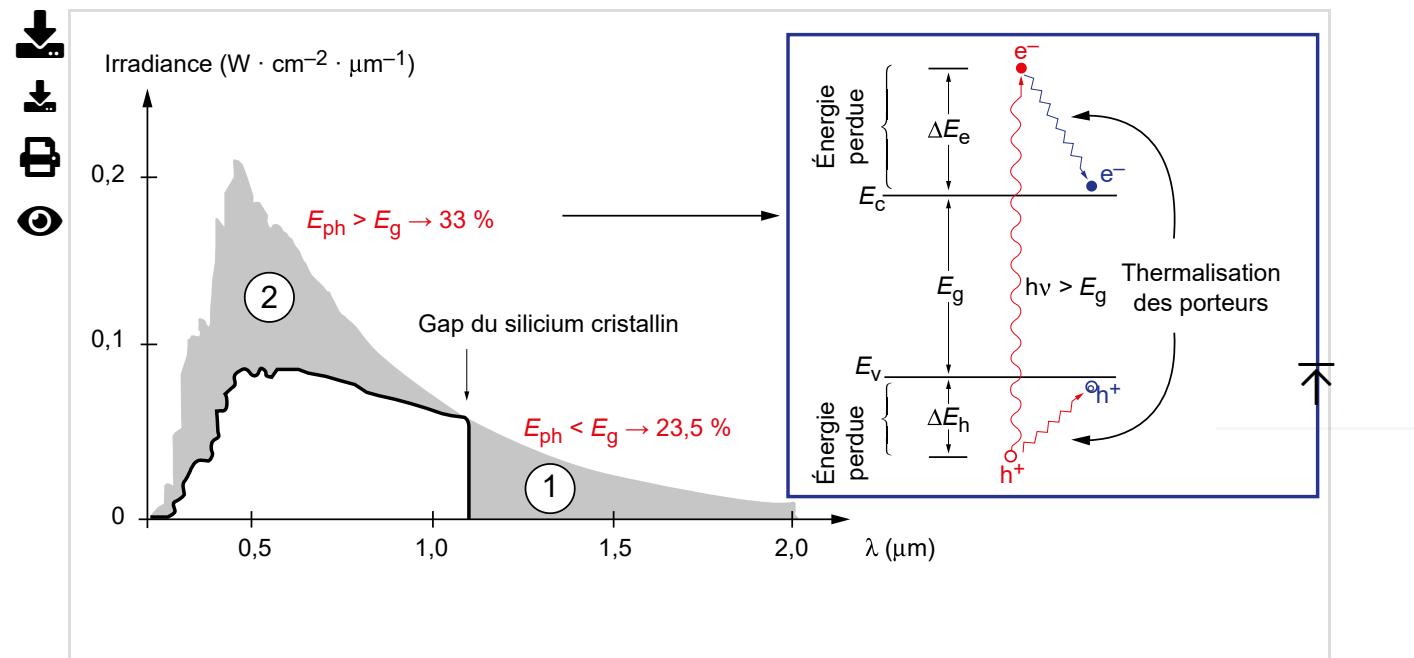


Figure 5 - Spectre solaire et partie en blanc potentiellement extraite d'une cellule silicium

■ Les pertes optiques

Le rendement d'une cellule dépend du nombre de photons utiles (d'énergie adapté) y pénétrant effectivement. Or, suivant les matériaux, leur réflectivité vis-à-vis de l'air est plus ou moins importante, en fonction de leur propre indice de réfraction. Une partie importante du flux lumineux peut donc être réfléchi sans jamais atteindre le semi-conducteur.

De plus, s'il y a des métallisations en face avant, celle-ci vont entraîner un ombrage qui va également constituer une perte optique plus ou moins importante.

Ainsi, le premier poste de perte est la réflexion des photons sur la surface de la cellule (rayon 1, figure 6).

D'autre part, une fois dans la cellule, les photons peuvent également ne pas être absorbés complètement suivant l'épaisseur de celle-ci et le coefficient d'absorption du semi-conducteur vis-à-vis des différentes longueurs d'ondes. C'est vrai, en particulier, du silicium qui est un semi-conducteur de gap indirect et dont les coefficients d'absorption sont faibles.

Il faut par **exemple** plusieurs centaines de μm d'épaisseur pour absorber totalement les photons utiles proches des Infra-rouges. Ils peuvent donc être réfléchis et une partie transmise à nouveau en face avant (rayon 2, figure 6) ou transmis et perdu à l'arrière de la cellule (rayon 3, figure 6).

L'ensemble de ces pertes peut être estimé en mesurant la réflectivité de la cellule pour chaque longueur d'onde à l'aide d'un spectrophotomètre.



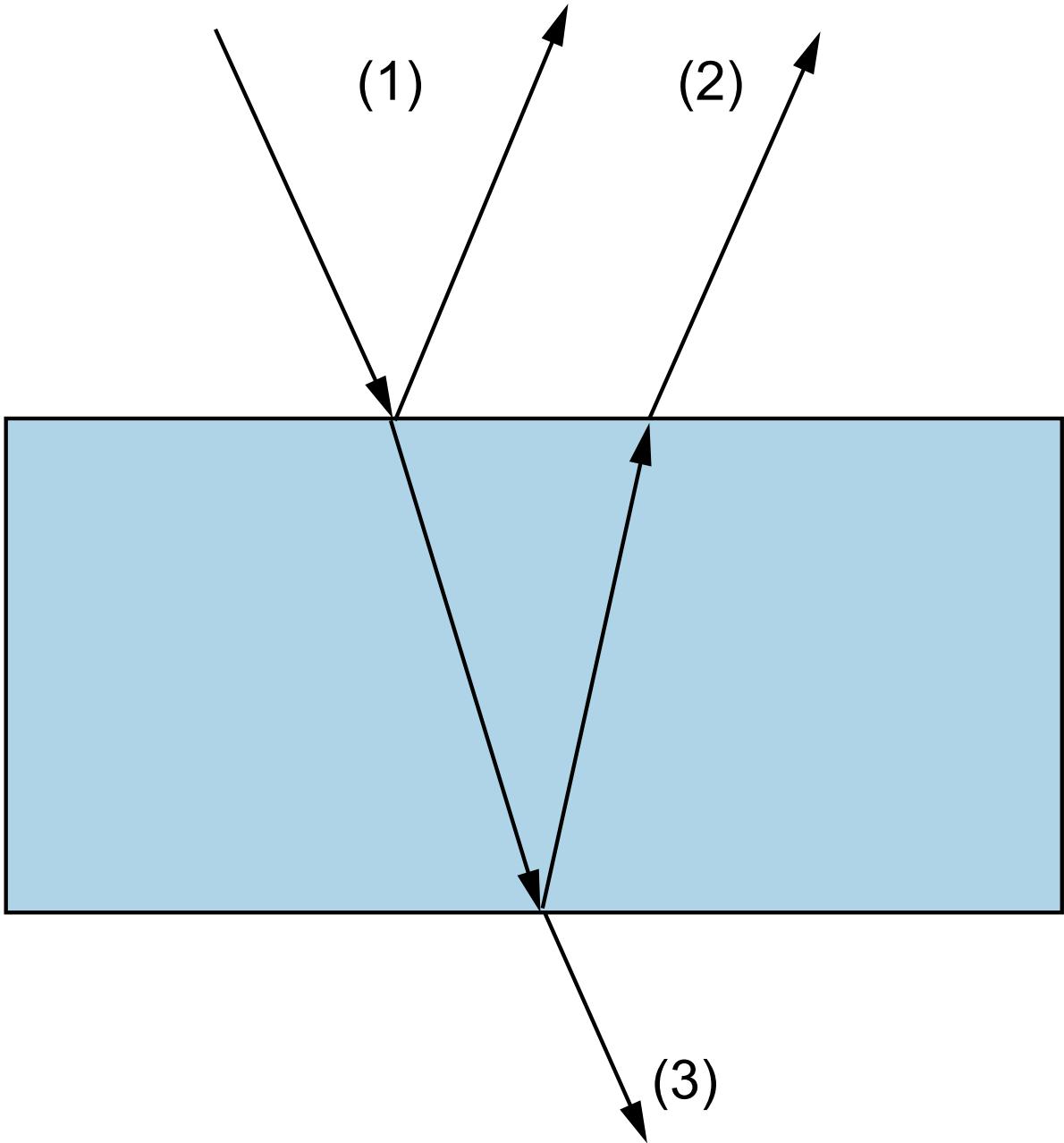


Figure 6 - Chemins optiques du rayonnement à l'extérieur et à l'intérieur de la cellule

- **Les pertes des porteurs photo générés (les paires électrons-trou)**

On distingue principalement deux types de recombinaisons.

- **Les recombinaisons en surface**

Elles sont dues principalement aux liaisons pendantes en surface (valences non satisfaites du semi-conducteur, en général très réactives) qui sont des puits de recombinaisons pour les porteurs.

L'importance de cette recombinaison peut être caractérisée par S : la vitesse de recombinaison en surface des porteurs minoritaires. Ainsi, S peut varier de quelques cm/s pour des surfaces très bien passivées à 10^7 cm/s pour des surfaces très recombinantes. Plus la cellule est de faible épaisseur, plus les recombinaisons de surface influent sur le rendement de la cellule.

Les pertes des bords des cellules sont également à considérer, en particulier lorsque celle-ci atteignent des rendements très élevés et que les recombinaisons de surfaces deviennent négligeables.

- **Les recombinaisons en volume**

Les recombinaisons dans les différents semi-conducteurs peuvent provenir de différentes origines, de type radiatif (avec émission de photons) et non radiatif (recombinaison de type Auger, SRH).

Les physiciens Shokley-Read-Hall ont modélisé les statistiques de génération et de recombinaison des paires électron-trou au sein d'un semi-conducteur en 1952 [2].

Les recombinaisons sont principalement dues aux défauts présents dans le volume du substrat (impuretés recombinantes, défauts cristallographiques comme les dislocations et joints de grains, etc.) et dépendent du niveau d'injection (on dira aussi de concentration) des porteurs minoritaires.

Elles sont caractérisées par :

- L_D : la longueur de diffusion des porteurs minoritaires ;
- τ_D : durée de vie des porteurs minoritaires dans le volume.

Ces deux grandeurs sont reliées par l'équation (3) :

$$L_D = \sqrt{(D \cdot \tau_D)} \quad (3)$$

avec :

D : coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans le matériau considéré.

Évidemment, pour atteindre un rendement maximal, on veillera à utiliser des matériaux suffisamment purs et exempts de défauts pour maximiser τ_D et donc augmenter les chances d'être collectés par la jonction.

- **Les pertes résistives liées à la collection des porteurs jusqu'aux métallisations**

Une cellule photovoltaïque possède une résistance série et une résistance shunt qui vont affecter le rendement de la cellule à travers une diminution du facteur de forme (FF) .

La résistance série est due à la somme des résistances des matériaux que les porteurs générés et collectés parcourent : en partant de la résistance liée au matériau semi-conducteur, à la résistance de contact entre les différentes couches de matériaux et les contacts métalliques et à la résistance des lignes métalliques elles-mêmes (voir figure 7).



La résistance shunt, quant à elle, représente les courants de fuite dans la cellule, les fuites par les bords de la cellule photovoltaïque, les fuites locales au niveau de la jonction. Elle permet de quantifier la non-idealité de la diode.

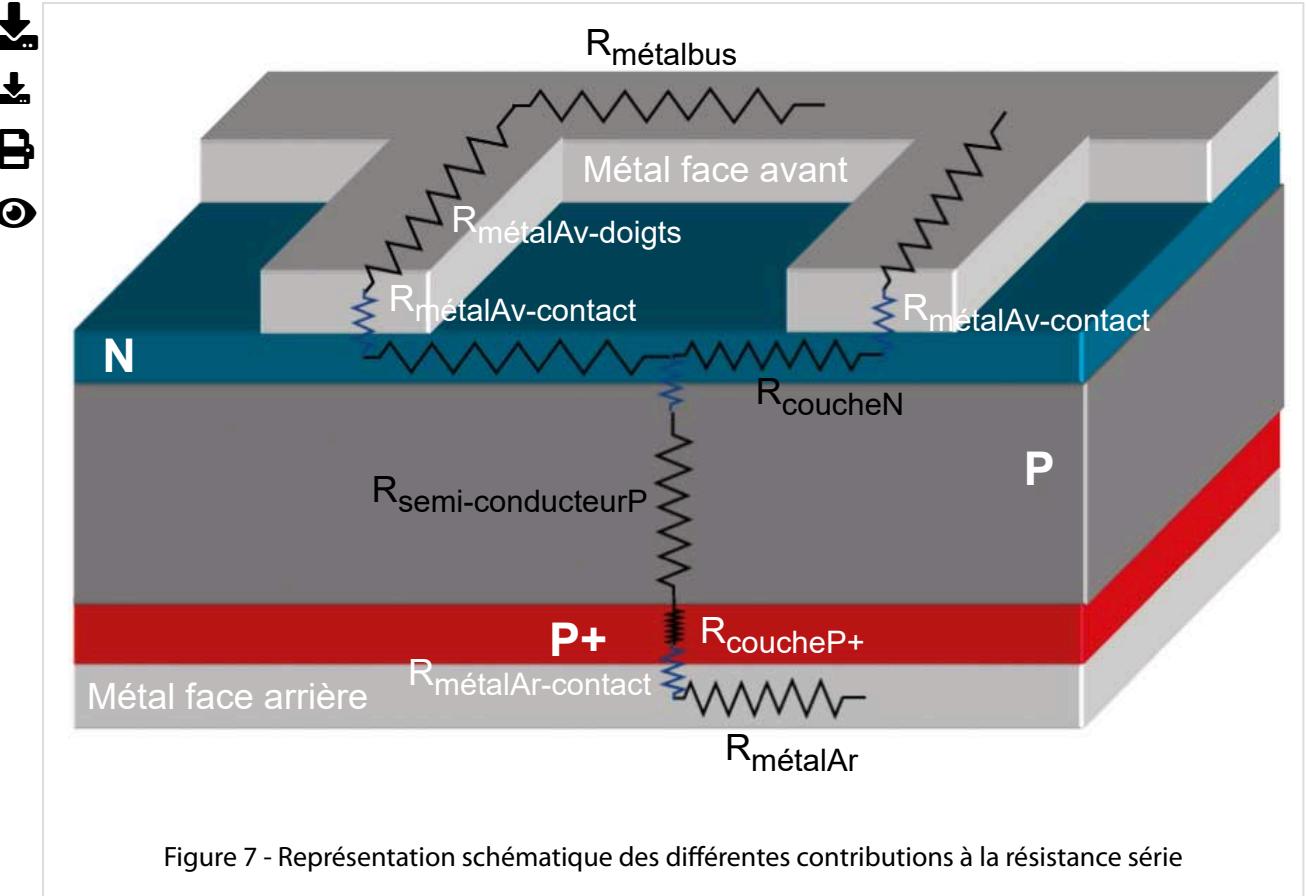


Figure 7 - Représentation schématique des différentes contributions à la résistance série

Conclusion

L'ensemble de ces pertes est un élément crucial à évaluer à chaque développement technologique pour mieux connaître les priorités technologiques à adresser pour augmenter les rendements.

Une partie de ces pertes peut être évaluée par caractérisation comme par **exemple** la mesure de la réflectivité de la cellule à l'aide d'un spectrophotomètre sur l'ensemble des longueurs d'ondes.

On peut également évaluer ces pertes par simulation en utilisant des logiciels basés sur la statistique de Shockley Read Hall en éléments finis et intégrant des modules de simulation de l'optique.

La mesure systématique de la longueur de diffusion ou de la durée de vie des porteurs au sein du semi-conducteur est également essentielle pour évaluer les pertes liées à la qualité intrinsèque du semi-conducteur et les pertes de surfaces liées aux couches déposées sur le semi-conducteur.

Différentes techniques ont été utilisées comme le QSSPC ou la photoluminescence qui permet d'avoir une information en deux dimensions. Pour décorrélérer la durée de vie en volume et la recombinaison de surface (en faisant l'hypothèse que la surface avant et arrière sont égales), on peut utiliser l'équation (4) :

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_d} + \frac{2S}{W} \quad (4)$$

avec :

τ_{eff} : durée effective mesurée,

W : épaisseur du semi-conducteur.

1.1.4 Stratégies technologiques pour limiter les pertes

1.1.4.1 Limiter les pertes énergétiques liées au gap

Pour limiter ce type de pertes, il existe deux grandes familles de solutions.

■ La conversion photonique

Certains matériaux à base de nanostructures photoémissives peuvent donner lieu à des phénomènes de conversion photonique qui permettent de convertir des photons de fortes énergies en plusieurs photons d'énergie plus faibles qui sont mieux convertis par la cellule car la thermalisation est beaucoup plus faible ; on parle de conversion vers le bas ou « down conversion » (voir figure 8).

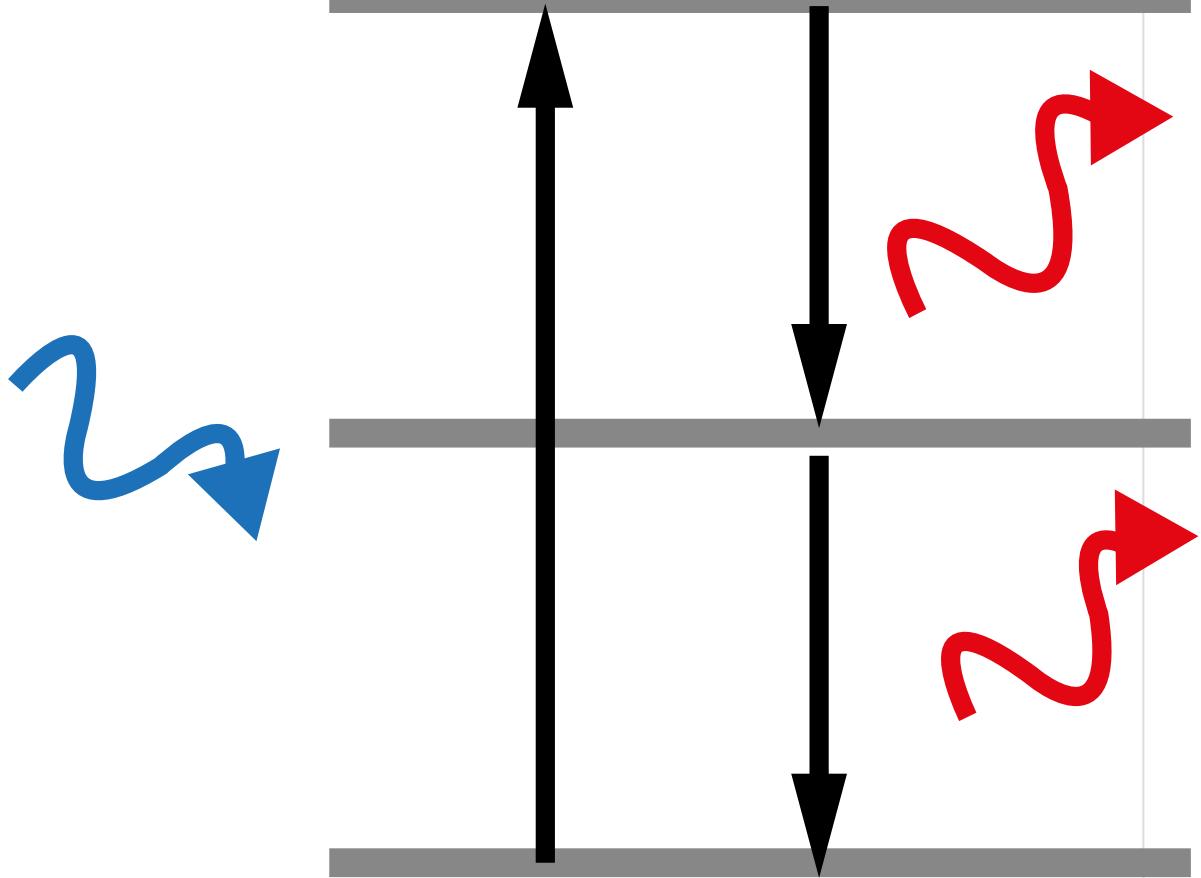
En théorie, on peut aussi imaginer de la conversion vers le haut (ou « up conversion ») qui permet de convertir deux photons de faible énergie et inférieur au gap du semi-conducteur en un photon utilisable par la cellule car d'énergie suffisante. Ce type de concept est néanmoins très difficile à mettre en œuvre.

Dans tous les cas, ce type de conversion n'est pas efficace à 100 % car l'émission des photons se fait potentiellement dans toutes les directions.

Aujourd'hui, on assiste à l'**émergence de la conversion vers le bas au niveau du module** pour deux raisons :

- améliorer les gains dans l'UV qui est une partie du spectre assez mal convertie par le silicium ;
- éviter la dégradation induite par les photons UV qui possèdent de fortes énergies et peuvent induire des dégradations des couches de passivations, et donc des performances des cellules sur le moyen long terme, mais aussi certaines couches de polymère au sein du module.





Conversion vers le bas (DC)

Figure 8 - Conversion vers le bas au cours de laquelle un matériau absorbe un photon de forte énergie et restitue cette énergie sous forme de deux photons d'énergie intermédiaire

La figure 9 explicite l'énergie de thermalisation perdue qu'on pourrait en partie récupérer par les stratégies de conversions photoniques sans avoir recours à d'autres semi-conducteurs. On voit que, si le rendement quantique de ces conversions photoniques est suffisant, on peut récupérer une bonne partie de l'énergie perdue dans l'UV et dans l'IR en conservant une seule jonction.



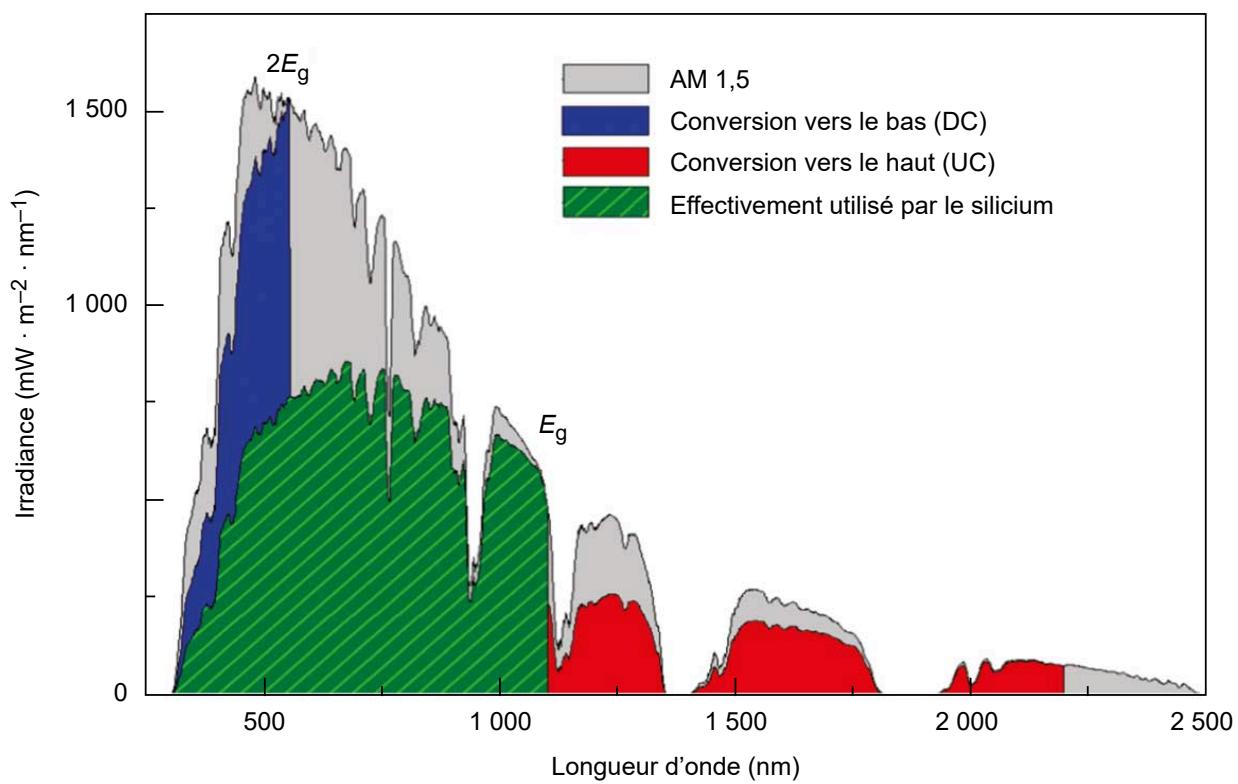


Figure 9 - Impact de la conversion vers le bas et vers le haut pour l'amélioration du rendement

- L'ajout d'un deuxième, voire d'un troisième (voir figure 10 pour 3 jonctions) ou d'un quatrième semi-conducteur**

Chacun de ces semi-conducteurs va pouvoir mieux convertir le spectre solaire en limitant la thermalisation et en étendant la conversion à des photons de plus faible énergie. C'est ainsi qu'une cellule avec 6 jonctions à base de matériaux III/V de type AsGa approche les 47,1 % de rendement du spectre solaire sous forte concentration du flux lumineux ☀. C'est également l'approche poursuivie actuellement en laboratoire pour dépasser la limite théorique du silicium en ajoutant une perovskite de plus grand gap au-dessus du silicium formant ainsi une cellule dite en mode « tandem ».

En matière technologique, il est important de comprendre que l'empilement se fait toujours du plus petit gap au plus grand gap et qu'une des grandes difficultés de cette approche est d'optimiser l'ensemble des sous-cellules pour permettre le passage du courant le plus grand possible dans les différentes sous-cellules qui sont en séries. Il y a également un enjeu important pour déterminer les bonnes couches d'interfaces entre les sous cellules afin de faciliter le passage du courant (on parle de jonction tunnel).



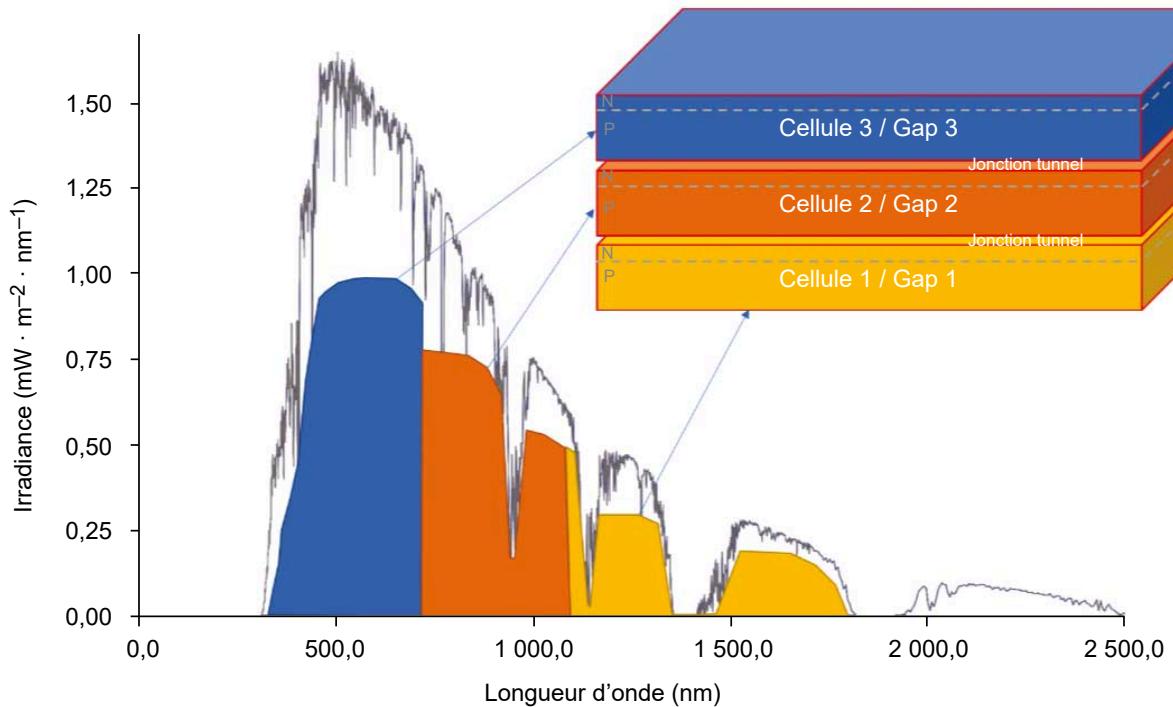


Figure 10 - Empilement schématique de 3 sous cellules de gap différents avec Gap1 < Gap2 < Gap3 et gammes de longueur d'onde adressées par chaque sous-cellule

1.1.4.2 Limiter les pertes optiques

Différentes approches permettent de diminuer les pertes par réflexion et/ou transmission des photons.

- **La texturation de surface**

C'est-à-dire la formation de relief de taille micrométriques, qui permet de diminuer les réflexions sur la face avant (éclairée), et d'augmenter le trajet optique des photons en les piégeant à l'intérieur du substrat (voir figure 11).

La texturation permet un meilleur confinement optique en donnant deux possibilités à la lumière de pénétrer dans le semi-conducteur comme le montre la partie droite de la figure 11.

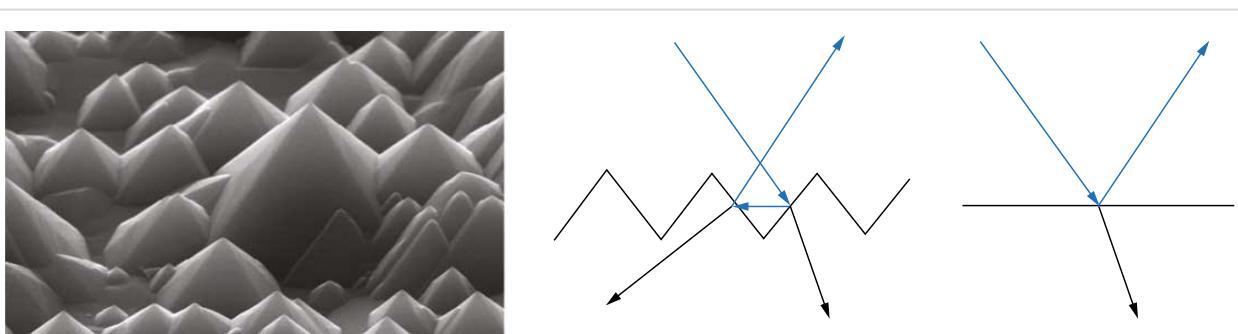


Figure 11 - Exemple de silicium texturé imparfaitement avec des tailles de pyramides hétérogènes (Crédit CEA)

- **Le dépôt en face avant d'une couche anti-reflet optimisée (figure 12)**

L'indice n_1 de réfraction est intermédiaire entre le semi-conducteur d'indice de réfraction n_2 et l'air (n_0) suivant l'équation (5) et permet de diminuer les pertes par réflexion. Il s'agira de déterminer l'épaisseur optimale de cette couche pour maximiser la quantité de photons pénétrant effectivement dans le semi-conducteur :

$$n_1 = \sqrt{n_0 \cdot n_2} \quad (5)$$

La figure 13 montre l'impact de ce type de stratégie technologique. On voit que l'impact est très important. La cellule devient d'aspect noir sur la réflectivité spectrale, l'œil étant un bon détecteur dans le visible du bon confinement optique de la cellule obtenue.

La réflectivité effective de la cellule permet de quantifier en pondérant sur le spectre solaire la réflectivité pour chaque longueur d'onde et le reflet de l'efficacité du confinement optique en face avant se calcule selon l'équation (6) :

$$R_{\text{eff}} = \int_{\lambda=0}^{\lambda=1,2} \frac{R(\lambda) \cdot A(\lambda) \cdot d\lambda}{A(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (6)$$

avec :

$A(\lambda)$: intensité du spectre solaire à une longueur d'onde considéré,

$R(\lambda)$: réflectivité pour une longueur d'onde donnée.

Mieux qu'une courbe, la notion de réflectivité effective permet en un chiffre de quantifier la qualité d'une couche anti-réflective pondérée du spectre solaire.

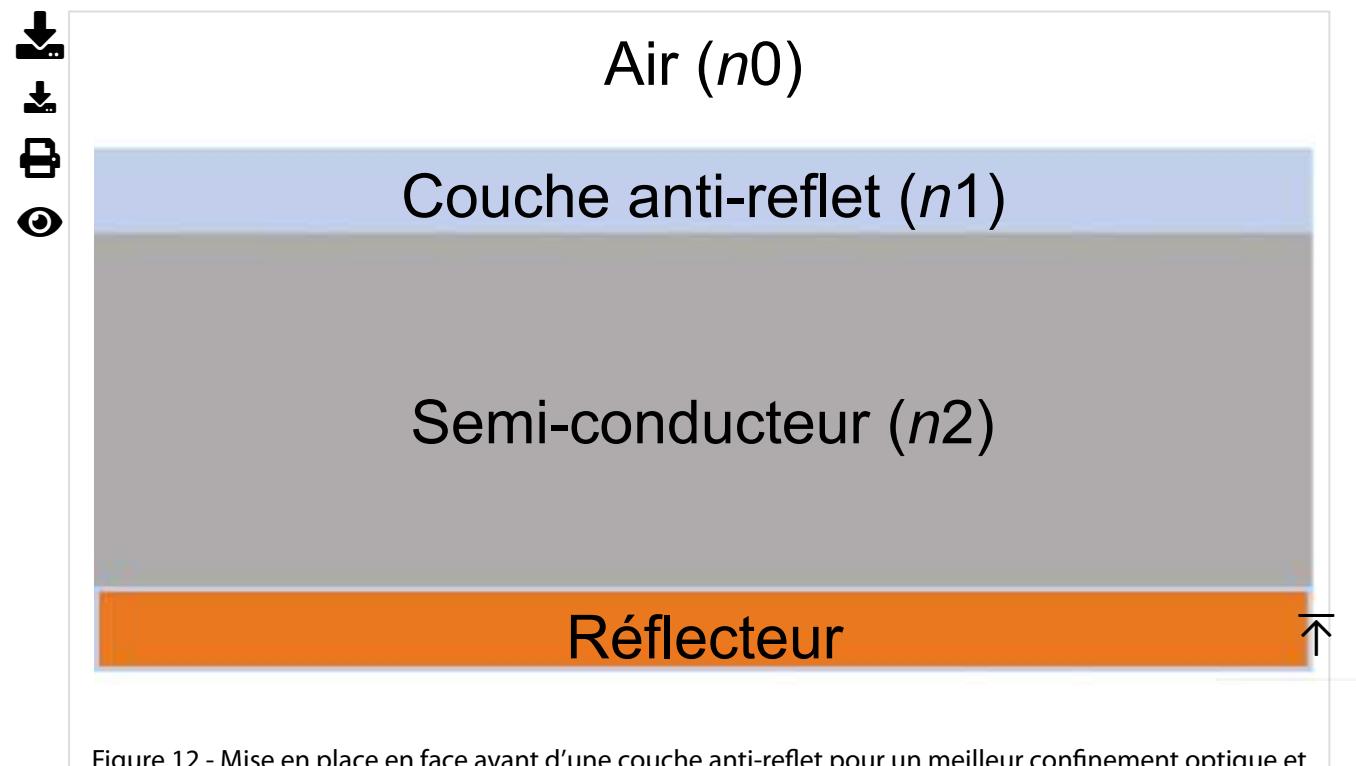


Figure 12 - Mise en place en face avant d'une couche anti-reflet pour un meilleur confinement optique et d'un réflecteur en face arrière permettant de réfléchir les photons non encore absorbés

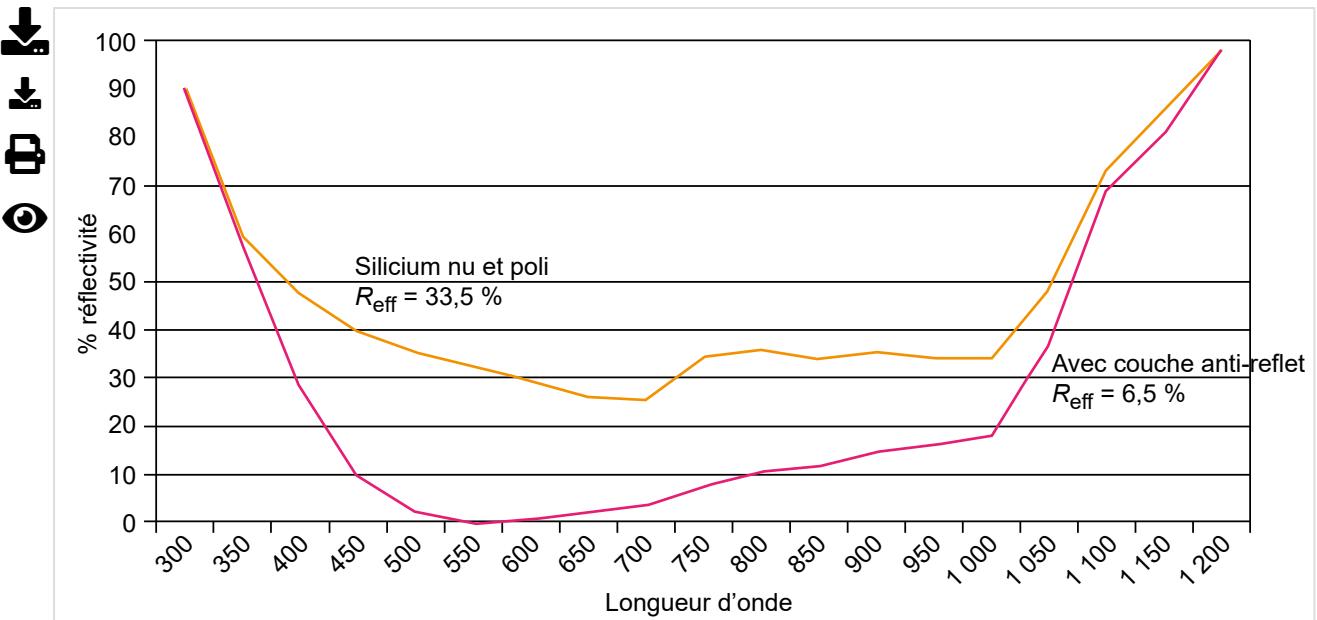


Figure 13 - Réflectivité du silicium poli ($R_{\text{eff}} = 33,5 \%$) sans et avec couche anti-reflet ($R_{\text{eff}} = 6,5 \%$) (Crédit CEA)

- La formation d'un réflecteur (généralement l'empilement d'un diélectrique et d'un métal) en face arrière

Cela permet la réflexion des photons, non encore absorbés dans le semi-conducteur et ainsi d'éviter les pertes par transmission est également intéressant pour maximiser le confinement optique (voir figure 12).

1.1.4.3 Limiter les pertes des porteurs photogénérés

- Les pertes dues aux recombinaisons en surface et sur les bords

Elles peuvent être considérablement réduites par le dépôt de couches dites de passivations qui vont saturer les défauts et les liaisons pendantes en surface du semi-conducteur. En effet, ces défauts de surface constituent des puits de recombinaisons des porteurs.

Ainsi, dans le cas du silicium, une surface brute peut passer de 10^7 cm/s à moins de 1 cm/s avec un nettoyage de surface et le dépôt d'une couche de silicium amorphe hydrogéné qui sature les liaisons pendantes. Toutefois, si la couche en surface est dopée, ce qui peut être recherché pour créer la jonction et/ou pour mieux conduire les charges latéralement, il est plus difficile de bien la passiver. Dans ce cas, on tentera d'identifier le meilleur compromis.

- Les pertes en volume

Elles sont liées à la qualité électronique du semi-conducteur qui dépend des défauts éventuels de sa structure cristalline (dislocations, macles, joint de grains, etc.) et des impuretés contenues dans le matériau qui peuvent considérablement affecter sa qualité électronique et en particulier la durée de vie des porteurs au sein du matériau. Pour cela, il sera nécessaire de travailler sur deux voies complémentaires :

- utiliser les matériaux les plus purs possibles en développant des procédés de purification de ces matériaux ;

- développer des méthodes de croissances cristallographiques permettant de limiter au maximum tous les défauts cristallographiques si on a affaire à une structure cristalline. Cela peut considérablement complexifier et renchérir le coût d'obtention du semi-conducteur.

1.1.4.4 Limiter les pertes résistives liées à la collection des porteurs jusqu'aux métallisations

De nombreuses possibilités existent pour limiter les pertes par résistance série en s'attaquant aux différents postes contributeurs (voir figure 7). Pour les plus importants, on notera les points suivants.

- **L'augmentation de la conductivité du semi-conducteur permet de faire diminuer la résistance série**

Cela peut s'avérer très bénéfique, en particulier en cas de nécessité d'avoir de bonnes conductions latérales des charges (dans certains design de cellules comme les IBC – voir description des différents types de cellules silicium). Ceci est parfois contradictoire avec sa qualité électronique car augmenter la conductivité entraîne une augmentation du dopage, il faudra alors identifier le meilleur compromis qualité électronique – conductivité.

- **Les porteurs doivent rejoindre les métallisations (doigts) latéralement**

La conductivité latérale de la couche de transport impacte fortement la résistivité dans son ensemble (voir figure 7).

- **L'amélioration des résistances de contacts a, en général, un impact fort sur la résistance série de la cellule.**

Le technologue s'attachera à mettre en œuvre des métaux et des couches d'interfaces pour les minimiser. Pour le silicium, l'argent est un métal bien adapté.

La méthode TLM (pour *Transition Line Method*) est typiquement utilisée pour évaluer la résistance de contact entre un métal et une couche conductrice ☐.

1.1.4.5 Limiter la résistance shunt

La résistance shunt doit être la plus élevée possible pour maximiser le rendement. La qualité de la jonction (caractérisée par son courant inverse I_{0J}) joue un rôle primordial et les procédés de fabrication associés à sa création doivent donc être particulièrement contrôlés et optimisés. Les métallisations peuvent également induire des défauts dans la jonction lors de la prise de contact et ce point doit également être travaillé, notamment en les éloignant de la jonction grâce à des couches intermédiaires.

Pour le silicium, on citera une couche de polysilicium dopé qu'on retrouve par exemple dans les dernières générations de cellules silicium (TOPCON pour *Tunnel oxide passivated contacts*) ou un oxyde transparent conducteur (comme dans la technologie hétérojonction, HTJ). Voir la description des différentes technologies cellules en silicium cristallin.



1.2 Historique technologique

L'effet photovoltaïque est une découverte relativement récente en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel, mais les premières cellules photovoltaïques réellement fonctionnelles, déjà au silicium cristallin, ont été réalisées en 1954 aux États-Unis par les laboratoires Bell. Pour de plus amples

précisions, voir ↗ [D 3 935].

Étant donné le coût de production très élevé à l'époque, les applications ont été initialement réservées au domaine spatial. En effet, les satellites ne disposent pas d'autres sources d'électricité pour fonctionner. Le premier du genre est le satellite américain « Vanguard » alimenté par des « piles » photovoltaïques.

Ce n'est que lors des chocs pétroliers des années 1970 que l'application terrestre a commencé à émerger, principalement pour les sites isolés ne disposant pas d'autres sources d'électricité disponibles, et pour lesquels le coût de raccordement au réseau électrique était prohibitif. Par exemple, les refuges en montagne ont été parmi les premières applications du photovoltaïque.

Par la suite, une véritable filière industrielle a commencé à se constituer en occident au début des années 2000, soutenue principalement par l'Europe et le Japon qui ont commencé à promouvoir les énergies renouvelables par des tarifs de rachats très incitatifs et le photovoltaïque, en particulier, avec pour objectif le prix du module photovoltaïque à moins de 1 €/Wc.

Au cours de cette période, de nombreuses filières technologiques se sont développées en parallèle (voir figure 14), présentant des avantages et inconvénients qu'on explorera par la suite dans le chapitre 3 ↗ .

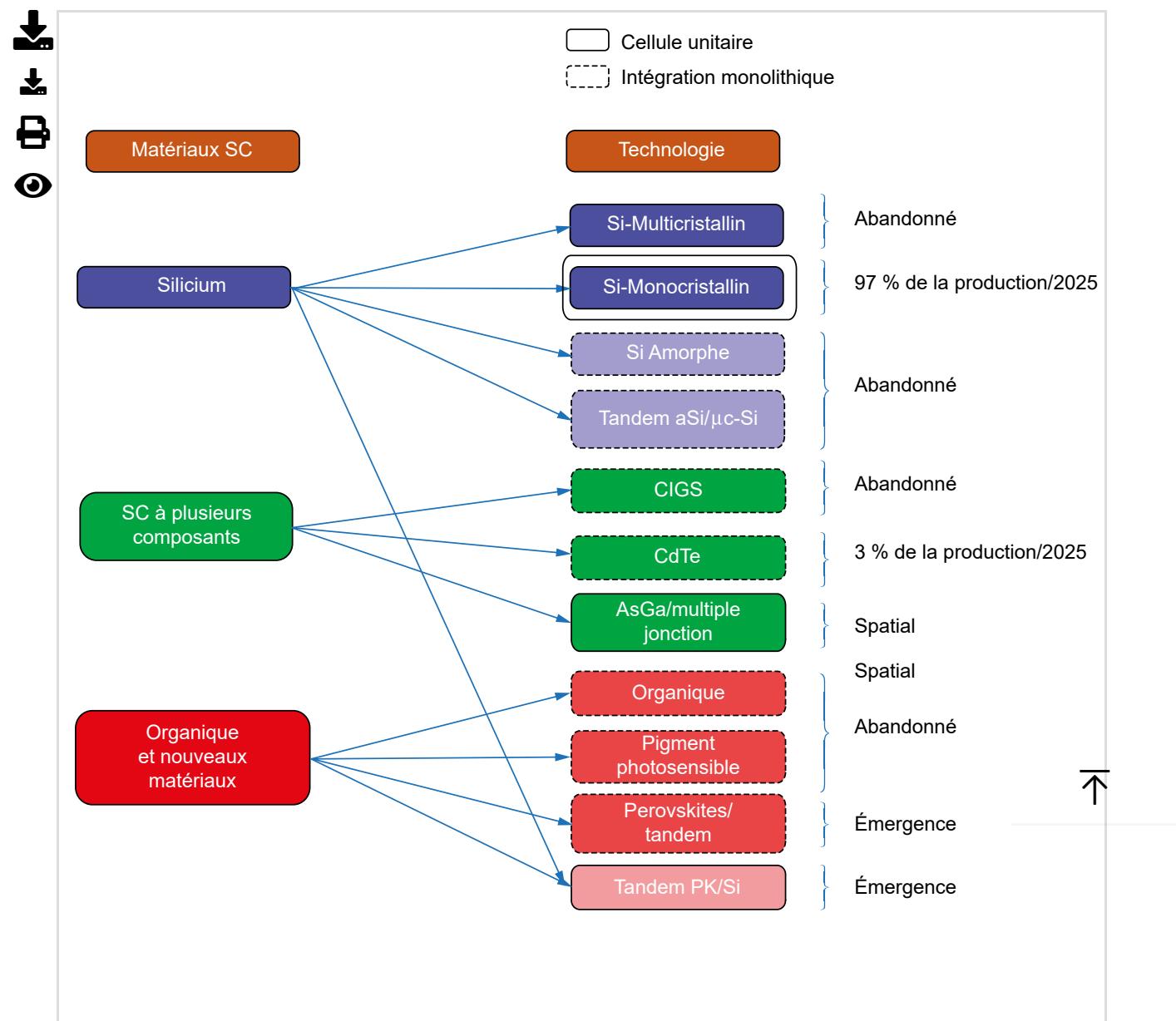


Figure 14 - Les différentes classes de semi-conducteurs et les technologies correspondantes en mode cellule unitaire ou en mode intégration monolithique, ainsi que leur statut en termes industriels

On notera que deux approches technologiques radicalement différentes se sont opposées.

▪ **Les technologies à base de cellules unitaires**

On réalise la cellule photovoltaïque sur un substrat semi-conducteur déjà constitué, par exemple en fabriquant un lingot et en le découpant en tranche de 100 µm ou plus. C'est le cas du silicium cristallin et ces tranches sont ensuite transformées en cellules unitaires. Puis, on les interconnecte entre elles grâce à des rubans de cuivre pour les mettre en série et on protège les cellules dans un « sandwich » de matériaux protecteurs au sein du module.

À noter que les **technologies à base de matériaux III/V** sont également basées sur des cellules unitaires avec un substrat AsGa, Ge ou InP.

▪ **Les technologies couches minces à base de semi-conducteurs variés (silicium amorphe, CIGS, CdTe, Perovskite plus récemment, etc.)**

Leur principe est de déposer les différentes couches actives sur une des faces du modules (du verre en général). Les techniques employées permettent de déposer sur des surfaces allant jusqu'à plusieurs m².

Pour éviter d'avoir beaucoup trop de courant et des pertes résistives importantes, et également monter en tension pour disposer d'un module à une tension raisonnable (quelques dizaines de Volts), on réalise une interconnexion monolithique par la gravure successive des différentes couches par des lasers (trois gravures sont typiquement réalisées, voir figure 15). Cela permet de créer des bandes de l'ordre du cm de largeur, puis le même type de protection que pour la technologie silicium est mis en œuvre au sein du module grâce à un empilement de matériaux protecteurs.

Après dépôt de la couche métallique une première gravure laser de dimension G1 est réalisée. Après dépôt du semiconducteur et de sa jonction, une seconde gravure G2 est réalisée pour isoler les différentes cellules entre elles. Enfin, après dépôt de l'oxyde transparent conducteur qui assure des propriétés de conduction latérale et anti réfléctrice, on réalise une troisième gravure G3 qui permet la connexion de la face avant de la première cellule à gauche à la face arrière de la seconde cellule à droite.

Ce procédé est parallélisé au sein d'un module et permet de générer autant de cellule qu'il est nécessaire en fonction de la taille du module.



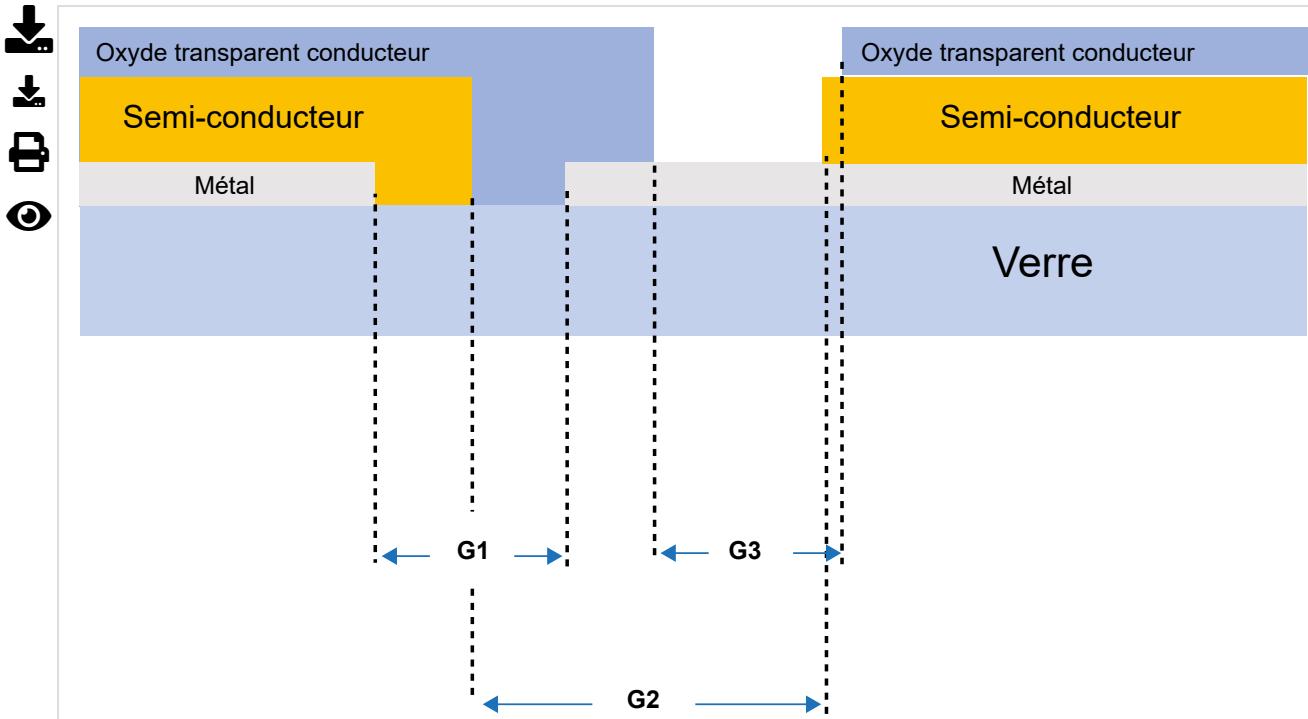


Figure 15 - Structure type de l'interconnexion monolithique permettant de définir des cellules unitaires au sein d'un procédé de type couche mince

- **Première approche avec des cellules unitaires**

Elle semble de prime abord plus laborieuse et complexe avec de nombreuses étapes intégrant des métiers très différents (métallurgie, cristallisation, découpe, fabrication des cellules sur les tranches du semi-conducteurs, mise en module) et coûteuse en énergie pour réaliser un module. *A contrario*, les technologies couches minces semblent plus simples et directes à mettre en œuvre avec une seule usine pour réaliser l'ensemble des étapes du matériau au module.

- **Au cours de cette bataille technologique entre les deux approches**

En particulier entre 2000 à 2015, les unités industrielles ont augmenté leur flux de production (passant de quelques MW par ligne de production en 2000 à plus de 500 MW par ligne en 2015 et plus de 1 GW/ligne en 2020), le rendement des modules a augmenté très significativement (de 12 % jusqu'à 20 %). De plus, la puissance et la taille des modules a considérablement augmenté (de 200 W à plus de 500 W).

Au cours de cette période, riche de progrès technologiques aboutissant à des performances remarquables, c'est bien le silicium cristallin qui a remporté quasi entièrement toutes les parts de marché et donc la production (près de 95 %) pour trois raisons principales :

- une capacité à augmenter le rendement de conversion de façon incrémentale sur un matériau très étudié scientifiquement et au niveau industriel (c'est le même matériau à la base de la microélectronique) ;
- une capacité à réduire les coûts matières et à augmenter la productivité grâce à des équipements toujours plus productifs permettant de réduire le coût global de production avec une ampleur inégalée ;

- une durabilité éprouvée et en constante amélioration permettant d'atteindre des garanties dépassant 25 ans pour la production d'énergie, voire 40 ans dans le marché du résidentiel.

La seule technologie couche mince à avoir pu résister au silicium est le CdTe, portée par la seule société qui commercialise cette technologie : First Solar (États-Unis). Elle a su faire évoluer la technologie vers de plus haut rendements et des tailles de modules toujours plus grandes. De plus, son modèle d'affaire est complètement intégré, c'est-à-dire qu'elle est positionnée sur toute la chaîne de la valeur : du matériau jusqu'à la vente d'électricité, ce qui lui permet de bénéficier de marge suffisantes. Elle intègre également le concept d'économie circulaire en prenant en charge le recyclage des modules CdTe.

Il faut noter, cependant, que ces modules contenant du Cadmium hautement toxique sont uniquement présents dans des centrales photovoltaïques et n'ont pas accès au marché du résidentiel et C&I (commercial et industriel).

À retenir

- Une cellule photovoltaïque permet la conversion des photons du spectre solaire en paire électron trou qui sont collectées pour produire de l'électricité, grâce à un semi-conducteur de gap adapté.
- Pour maximiser le rendement de conversion du spectre solaire, il est nécessaire de réduire l'ensemble des pertes d'une cellule, en termes optique, électronique, électriques pour une technologie et un semi-conducteur donnés.
- L'utilisation de plusieurs semi-conducteurs dans une cellule multijonction permet d'augmenter significativement le rendement.
- Au cours de l'histoire technologique du PV, de nombreuses approches technologiques à partir de différents semi-conducteurs ont été investiguées, avec deux grandes familles : les cellules unitaires qui nécessitent un substrat semi-conducteur, et les approches couches minces qui nécessitent une intégration monolithique. C'est l'approche cellule unitaire et le silicium cristallin qui dominent de façon écrasante la production pour les applications terrestres.



Cet article fait partie de l'offre

Conversion de l'énergie électrique

(264 articles en ce moment)

CETTE OFFRE VOUS DONNE ACCÈS À :

UNE BASE COMPLÈTE D'ARTICLES

Actualisée et enrichie d'articles validés par nos comités scientifiques

DES SERVICES

Un ensemble d'outils exclusifs en complément des ressources

DES MODULES PRATIQUES

Opérationnels et didactiques, pour garantir l'acquisition des compétences transverses

DOC & QUIZ

Des articles interactifs avec des quiz, pour une lecture constructive

→| ABONNEZ-VOUS

Pensez à vous inscrire gratuitement à la veille personnalisée !

