



## LE PHOTOVOLTAÏQUE FONCTIONNEMENT ET TECHNOLOGIES

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le principe photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905 (c'est pour cette explication qu'il a reçu le prix Nobel de Physique en 1921).

Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse.

### 1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La cellule PV, aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable, le soleil. Elle exploite les propriétés des matériaux semi-conducteurs utilisés dans l'industrie de l'électronique : diodes, transistors et circuits intégrés.

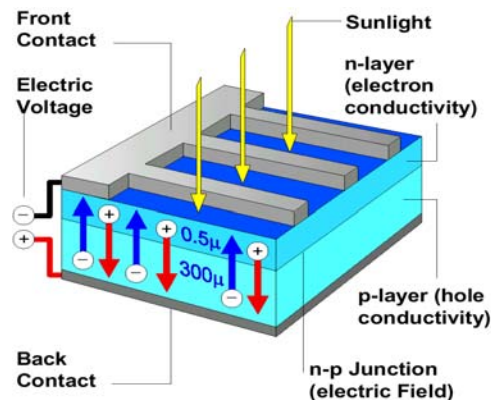


Figure 1 : représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie  $h\nu$  à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure.

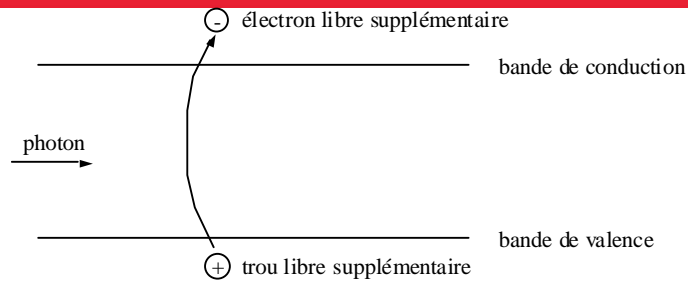


Figure 2: le photon incident crée une paire électron / trou

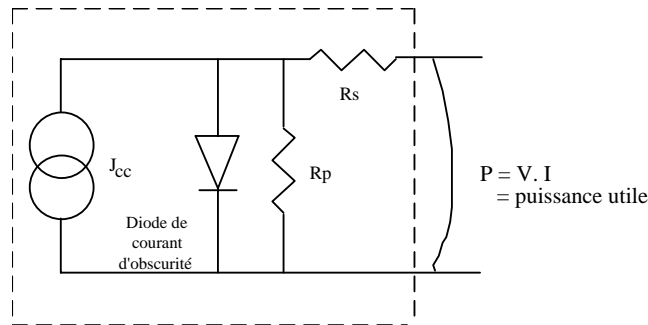


Figure 3 : circuit équivalent à une diode modélisant la cellule photovoltaïque (de gauche à droite, générateur de courant, diode, résistance parallèle  $R_p$  et résistance série  $R_s$ )

## 2. LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

Pour passer de l'effet photovoltaïque à l'application pratique, il est nécessaire de trouver des matériaux qui permettent d'optimiser les deux phases essentielles de ce principe:

1. Absorption de la lumière incidente
2. Collection des électrons en surface

Les cellules PV sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs qui sont capables de conduire l'électricité ou de la transporter. Plus de 90 % des cellules solaires fabriquées à l'heure actuelle sont au silicium cristallin, un semi-conducteur. Une des faces de la cellule est dopée **n** (par exemple du phosphore). L'autre est dopée **p** (par exemple du bore). Des électrodes métalliques sont placées sur les 2 faces pour permettre de récolter les électrons et de réaliser un circuit électrique.

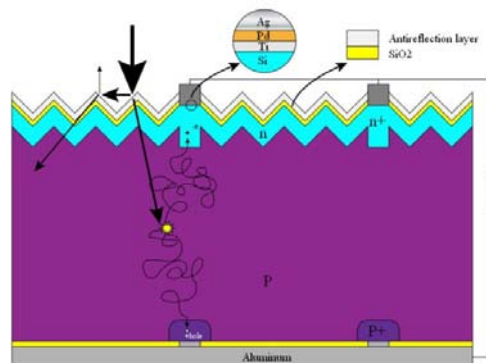


Figure 4: Coupe schématique d'une cellule photovoltaïque au silicium

La face supérieure de la cellule est traitée de manière à optimiser la quantité de lumière entrant dans la cellule au moyen de traitement de surface, par l'application d'une couche anti réflexion. Les faces supérieure et inférieure sont équipées d'électrodes pour récolter les électrons. Il existe différentes technologies de cellules photovoltaïques. Les différences entre elles se situent au niveau des matériaux utilisés et des procédés de fabrication.

## DIFFERENTS TYPE DE TECHNOLOGIES DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

### 1ère génération: Silicium cristallin (mono et poly)

Cette génération de cellule repose sur les wafers (fine tranches) de silicium cristallin. Ces wafers sont sciés dans des lingots de silicium. Ces lingots sont le résultat d'un processus de purification de manière à obtenir un matériau contenant 99.9999% de Silicium.

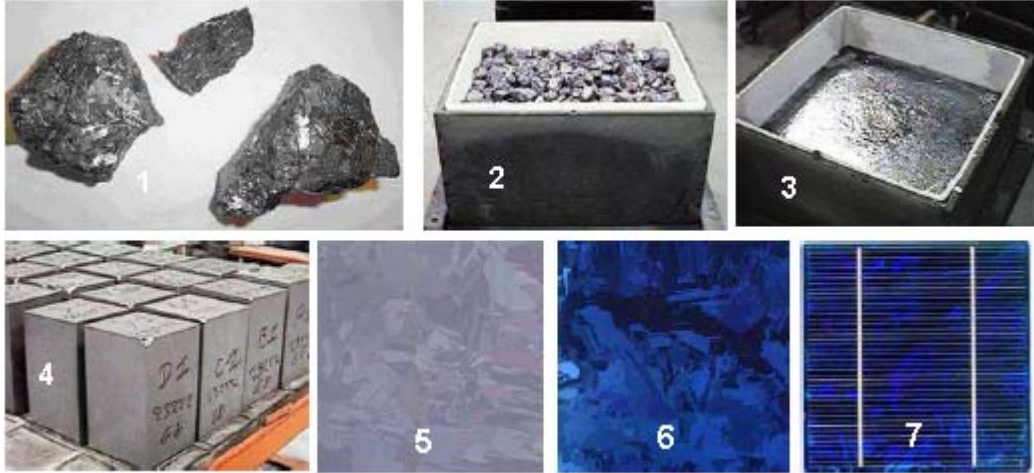


Figure 5 : Etape de fabrication des cellules : (1) minerai de Silicium – (2) raffinage (pour augmenter la pureté) – (3) Silicium en fusion donnant des lingot (4) après solidification – (5) wafer obtenu par sciage du lingot – (6) traitement de surface par procédés physico chimiques et (7) cellule finie avec électrodes

Les cellules cristallines se subdivisent en 2 catégories : mono- et poly- cristalline selon le type de structure. Ces deux types de cellules proviennent de procédé de purification et de solidification différents (processus Czochralski (Cz) et processus Siemens). Les procédés de purification Cz et Siemens ont des structures d'approvisionnement différentes et sont généralement réalisées par des industries différentes.

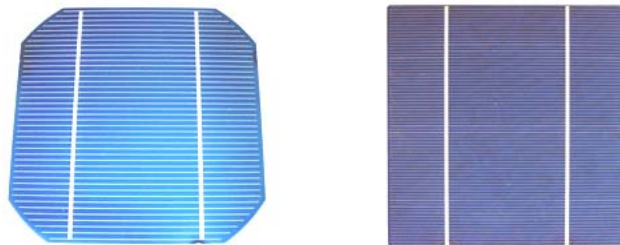


Figure 6: cellule mono cristalline et poly cristalline

Les cellules monocristallines se distinguent à leurs coins cassés et à leur aspect uniforme. Les cellules poly-cristallines ont quant à elles un aspect plus irisé provenant de l'orientation des différents réseaux cristallins par rapport au plan de coupe.

Ces technologies sont caractérisées par des efficacités de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique allant de 12% à 14% (poly-cristallin) et de 13% à 19% (monocristallin), au niveau des modules commerciaux les plus largement utilisés.

## 2ème génération: CdTe, CIS/ CIGS, silicium amorphe et microcristallin

Cette génération de cellule repose sur la déposition de matériaux semi conducteurs en couches minces (*thin film*). Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PE-CVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) sur un substrat. L'épaisseur de la couche varie entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres. Ces technologies qui étaient initialement chères étaient réservées aux applications spatiales (en raison de leur poids par watt crête plus faible) et aux technologies de concentration. Avec l'augmentation des volumes de production, le prix de revient de ces technologies a baissé pour devenir compétitif avec les technologies cristallines de la première génération.

Parmi les technologies en couches minces qui sont exploitées industriellement (production de masse), on distingue :

CdTe : Cadmium Telluride (telluride de cadmium)

CIS / CIGS : Copper Indium Gallium Selenide

Silicium en couche mince : silicium amorphe  $\alpha$ Si et microcristallin

Ces technologies sont caractérisées par des efficacités de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique allant de 6% ( $\alpha$ Si) à 5 à 11% (CdTe) (efficacité des cellules, les modules présentant une efficacité un peu moindre due aux espaces entre les cellules).

A noter que le tellure de cadmium est un alliage de métal lourd, très toxique, et peut -tout comme le plomb ou le mercure- se concentrer dans la chaîne alimentaire. L'UE en a interdit l'usage pour les appareils électriques... exception faite pour les cellules PV...



Figure 7 : modules verre-verre au Telluride de Cadmium, efficacité de 9 à 11%



Figure 8 : façade en CIGS au Pays de Galles, efficacité de 8,5%

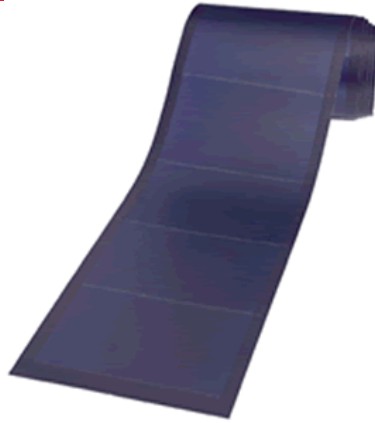


Figure 9 : module photovoltaïque souple au silicium amorphe aSi triple jonction pour une efficacité de 6,5% (photo Unisolar)



Figure 10 : module combinant technologie microcristalline et amorphe pour une efficacité de 8,5% (photo Phoenix Solar)

## Technologies photo-électro-chimiques (Dye Sensitised Cell et Organic PV)

Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Il en existe principalement deux types:

- Les cellules photovoltaïques organiques moléculaires
- Les cellules photovoltaïques organiques en polymères

Apparues dans les années 1990, ces technologies ont pour but de réduire le coût de production de l'électricité. Les cellules photovoltaïques organiques bénéficient du faible coût des semi-conducteurs organiques et des simplifications potentielles dans le processus de fabrication. Elles offrent la perspective d'une production en continu (roll-to-roll) qui pourrait réduire drastiquement le prix de revient des panneaux solaires.



Figure 11 : sac à dos incorporant un module de technologie organique DSC

Pratiquement, ces technologies ne sont utilisées commercialement aujourd'hui que dans le secteur de l'électronique de consommation (chargeur de GSM/ baladeur MP3) où la durée de vie de la cellule et du produit associé sont approximativement égales (2 ans). En améliorant la durée de vie ou en réduisant les coûts de production, d'autres applications devront voir le jour dans les années à venir.

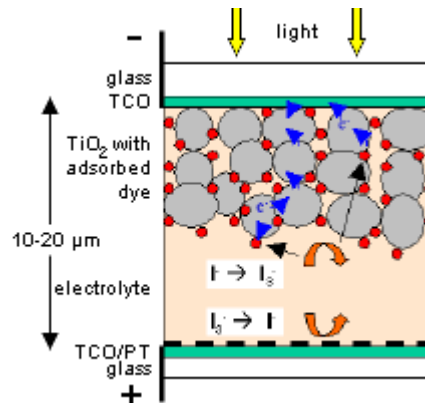
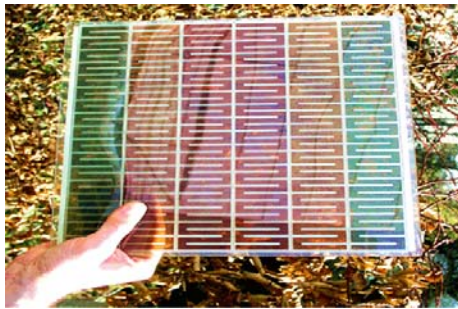


Figure 12: Cellule Dye Sensitized Cell - coupe explicative

Encore au stade de recherche expérimentale, le record de rendement est compris entre 4 et 5% en laboratoire. Avant une possible commercialisation, des avancées concernant l'efficacité et l'encapsulation doivent encore être réalisés.

## ÉVOLUTION DES RENDEMENTS DES DIFFÉRENTS TYPES DE CELLULES

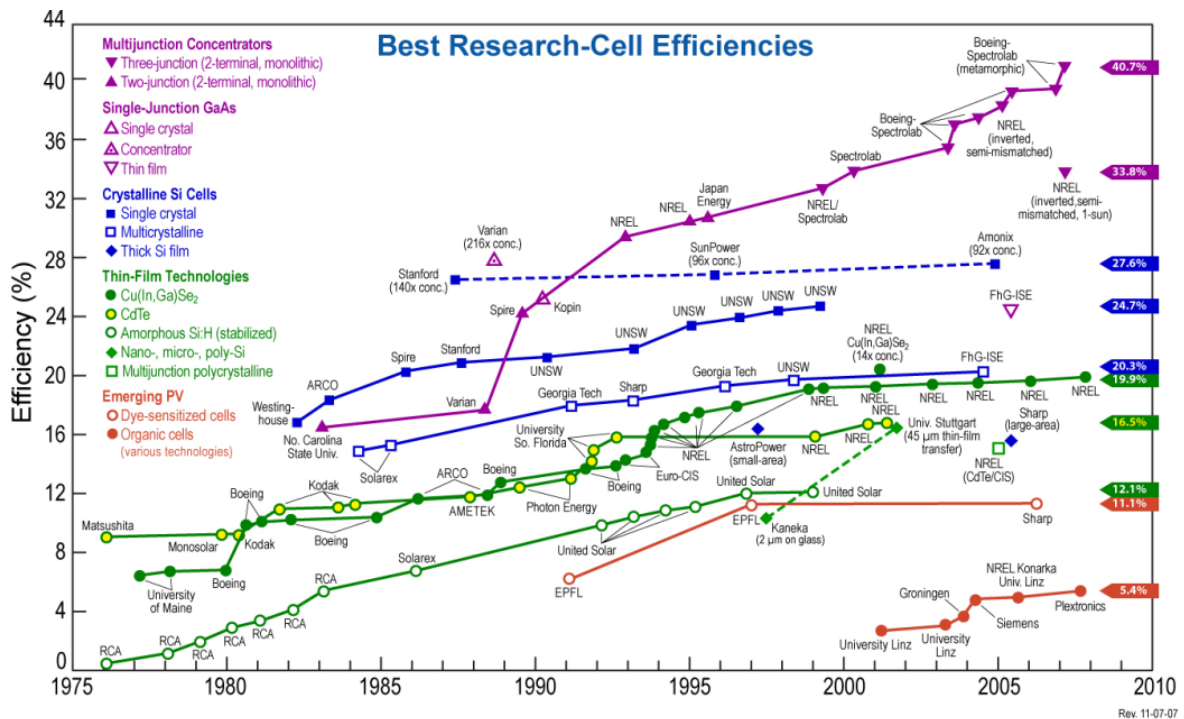


Figure 13: diagramme montrant les différentes technologies et l'évolution des rendements des cellules au niveau de laboratoire

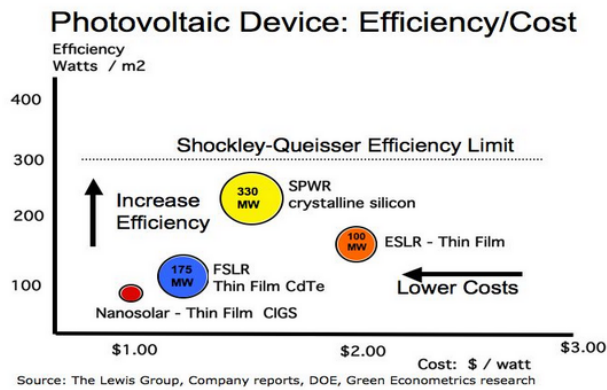


Figure 14 : répartition des différentes technologies en termes de prix et rendements (2007)

La Figure 13 et la Figure 14 montrent l'évolution de l'efficacité des différentes technologies. Ces résultats illustrent les efficacités atteintes pour les meilleures cellules en laboratoire. Les différentes familles de technologies sont indiquées par des couleurs différentes. Les rendements sont évidemment plus hauts qu'au niveau commercial car les conditions de fabrication ne sont pas standardisées ni industrialisées au niveau de laboratoire.

La Figure 14 présente la limite de Shockley-Queisser qui fixe l'efficacité (rendement) maximale théorique d'une cellule solaire composé par jonctions p-n. Les abréviations SPWR, ESLR et FSLR appartiennent aux noms de différents fabricants respectivement : Sunpower, Evergreen Solar et First Solar inc. Par contre CIGS signifie Cuivre Indium Gallium Sélénium, un alliage utilisé par le fabricant Nanosolar (voir graph) principalement pour la fabrication d'une cellule solaire sous forme d'une couche mince polycristalline. Les chiffres entre chaque cercle de couleur représentent la puissance produite (approximativement) de chaque technologie.

On peut dire que les efficacités « typiques » des différentes technologies sont :

	Silicium amorphe	Teluride de Cadmium	C(G)S	silicium amorphe / microcristallin	monocristallin	polycristallin
efficacité de cellule aux STC *	5 - 7 %	8 - 11 %	7 - 11 %	8%	16 - 19 %	14 - 15%
efficacité de module aux STC					13 - 15 %	12 - 14%
Surface requise pour obtenir 1 kWc	15 m <sup>2</sup>	11 m <sup>2</sup>	10 m <sup>2</sup>	12 m <sup>2</sup>	~ 7 m <sup>2</sup>	~ 8 m <sup>2</sup>

\* STC : conditions de test standard 1000 W/m<sup>2</sup>, 25°C, spectre AM 1.5

Figure 15 : Efficacités typiques des différentes technologies PV utilisées commercialement (source Photon International Modules Survey 2009)

### 3. LES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES

Les cellules cristallines telles qu'elles ne permettent pas d'utiliser l'énergie photovoltaïque de manière efficace et pérenne. En effet, les cellules ne développent qu'une puissance relativement faible (de l'ordre de 3 W) et sont extrêmement fragiles et sensibles aux éléments extérieurs (corrosion). Pour utiliser l'énergie PV à grande échelle, les cellules sont connectées entre elles en série pour augmenter la tension et en parallèle pour augmenter le courant. Elles sont ensuite encapsulées entre une feuille de verre et une feuille de Tedlar (Polyvinyl fluorure (PVF) ou  $-(CH_2CHF)_n-$ ) à l'aide d'un polymère (éthylène vinyl acetate EVA).

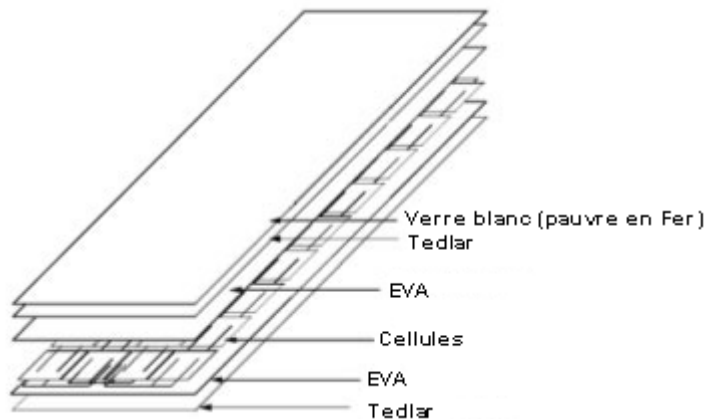


Figure 16 : composition d'un module photovoltaïque au silicium cristallin

Les modules les plus courants mesurent 1580 x 808 mm et contiennent 72 cellules pour une puissance de 200 Wc. Il existe des modules de tailles différentes allant de 1 cellule (100 mm x 100 mm) jusqu'à des modèles pour intégration en façade de 2631 x 1645 (117 kg pour 580 Wc). Actuellement, des modules de 300 Wc et plus se développent sur le marché.

Les cellules d'un module typique sont séparées en plusieurs segments d'environ 18 cellules qui sont protégées par des diodes. Si une de ces cellules venait à être ombragée, la diode se déclencherait de manière à protéger les cellules de cette partie de module.



Figure 17 : différents types de modules PV

Enfin, Chaque module est testé en bout de chaîne sous des conditions normalisées : Standard Test Conditions (STC) : éclairement : 1000W/m<sup>2</sup>, t° cellules : 25°, Air Mass<sup>1</sup> : 1,5

<sup>1</sup> Air Mass : masse d'air optique. Lors de sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire direct est affaibli par absorption et diffusion sur les molécules gazeuses et les particules atmosphériques. Cet affaiblissement du rayonnement (extinction) est fonction du nombre de ces particules et molécules et également de la longueur du trajet parcouru par les photons avant de parvenir sur la cellule PV (trajet plus long au coucher du soleil qu'à midi solaire notamment). L'extinction unitaire correspondant à une masse d'air optique de 1 représente l'extinction du rayonnement extraterrestre ayant traversé verticalement l'atmosphère jusqu'à un point situé au niveau de la mer, pour une pression atmosphérique de 1 013 mb. AM 1,5 correspond à un angle solaire de 41,8°).



## 4. RECYCLAGE DES MODULES

Les modules sont recyclables en fin de vie (après 25 à 30 ans). Il est possible de récupérer le verre, l'aluminium des cadres, le silicium des cellules et le cuivre des connecteurs. Ce recyclage permet de réduire le coût énergétique des modules suivants, car une partie des opérations d'extraction et de raffinage n'est plus nécessaire.

L'industrie photovoltaïque européenne a lancé l'initiative PVCycle ([www.pvcycle.org](http://www.pvcycle.org)) qui vise à recycler - gratuitement - les modules photovoltaïques en fin de vie.

## 5. L'ONDULEUR

L'onduleur est un élément essentiel d'une installation photovoltaïque. C'est une machine d'électronique de puissance qui transforme l'énergie électrique DC issue des modules PV en énergie électrique AC, directement utilisable localement ou injectée sur le réseau. Cet onduleur doit être équipé d'un dispositif automatique de déconnexion du réseau (protection de découplage) : lorsque la tension du réseau chute ou disparaît, l'onduleur doit instantanément se déconnecter pour éviter toute injection de courant à ce moment (sécurité). De même, l'onduleur doit être équipé d'un mécanisme de protection contre l'injection de courant continu sur le réseau.

Pour ces raisons de sécurité, l'onduleur installé doit faire partie des équipements agréés VDE 0126 adapté au contexte belge<sup>2</sup>.

Il existe différentes catégories d'onduleur selon l'application envisagée :

Applications autonomes (non raccordées au réseau) : ces onduleurs génèrent un signal de 220V d'amplitude et de 50 Hz de fréquence de manière à créer un réseau AC. Ils peuvent être combinés à un régulateur de charge et des batteries pour stocker de l'énergie pour une utilisation de nuit.

Application raccordées au réseau : on distingue plusieurs catégories d'onduleurs raccordés au réseau :

1. Les onduleurs centraux : ces onduleurs sont logés dans des armoires industrielles et délivrent des puissances AC de 50 à 500 kVA en triphasé (1 VA = 1 W quand le cos phi vaut 1, ce qui est le cas avec les onduleurs. Souvent on utilise l'unité VA pour la partie AC du circuit pour éviter la confusion entre les Watt crêtes et les Watt « réels »). Ils sont généralement installés pour les grands projets (à partir de 60 kWc) dans des locaux dédiés à cet effet. (Figure 18)



Figure 18 : Exemples d'onduleurs centraux (Siemens) de 100 à 420 kW (ac)

<sup>2</sup> Voir dans le texte de la norme VDE 0126 : paragraphe concernant la réglementation

2. Les onduleurs de string (string inverter) : ces onduleurs reçoivent les contributions de quelques strings et développent des puissances de quelques 0.7 à 11 kVA en mono- ou triphasé. Ces onduleurs qui peuvent parfois être installés en extérieur existent avec ou sans transformateur intégré. Les modèles sans transformateur ont de plus hautes efficacités de conversion, les meilleurs modèles atteignant 98% contre 96% pour les modèles avec transfo. (Figure 19)

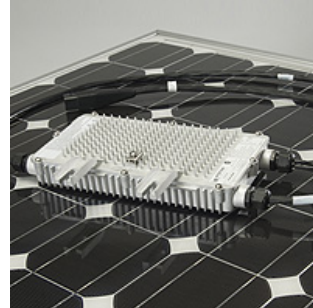


Figure 19 : Onduleur de string (SMA) sans transformateur Figure 20: micro onduleur (Enphase)

3. Les onduleurs de modules : ce type d'onduleur vient se connecter directement à un module au niveau du boîtier de jonction. Les modules ainsi équipés sont connectés au niveau AC en parallèle. L'avantage est de ne plus devoir se soucier des problèmes de mismatch entre modules de caractéristiques disparates. Les problèmes d'ombre sont également limités aux modules ombragés vu qu'il n'y a plus de string de modules. (Figure 20)

Le choix de l'onduleur repose donc sur plusieurs considérations :

- Taille du projet (système individuel de 1 kWc ou installation de plusieurs dizaines de kWc) et préconisation du GRD.
- Adéquation modules – onduleur tant en terme de plage de fonctionnement de tensions qu'en terme de compatibilité (exemple : beaucoup de fabricants de modules amorphes préfèrent que l'on utilise des onduleurs avec transformateur pour éviter d'injecter des composantes DC sur le réseau)
- Financière : ce n'est pas parce qu'un onduleur est meilleur marché que l'on va réaliser des économies si l'efficacité du modèle meilleur marché est inférieure.
- Le rendement européen de l'onduleur : l'onduleur ne fonctionnant pas à charge maximale toute l'année, la notion de rendement européen permet de prendre en compte la fréquence et les variations d'ensoleillement et donc de mieux comparer les onduleurs entre eux.
- La configuration du champ de capteurs (influence des ombrages notamment)

Enfin, l'utilisateur final aura soin de demander le manuel d'utilisation de l'onduleur afin, entre autre, de se familiariser avec le dispositif d'affichage qui relaie les informations de production et de pannes / mal fonctions.