Modules photovoltaïques : la course technologique et économique

Jean-Pierre JOLY

CEA INES (Institut national de l'énergie solaire)
50 avenue du Lac Léman, 73375 Le Bourget du Lac, France

jean-pierre.joly@cea.fr

Du rang de curiosité pour passionnés de l'environnement, l'énergie solaire photovoltaïque est en passe de devenir une énergie de masse, capable d'assurer une part significative de notre énergie électrique. Ainsi, elle est passée devant toutes les autres énergies en termes de capacité installée en 2012 en Europe et elle assure 6 % de la production d'électricité dans des pays comme l'Allemagne et l'Italie, avec une part de puissance instantanée pouvant dépasser les 30 %.

L'essor du photovoltaïque a été rendu possible en premier lieu grâce à des systèmes de subventions, en particulier le mécanisme de tarif d'achat à taux privilégié, mais avec l'objectif, par le développement du marché, de faire chuter le prix des matériels et tout particulièrement celui des modules. Une courbe d'apprentissage montrant que le prix chute de 20 % chaque fois que le marché double a servi de fil directeur à cette politique. Ce pari a été réussi et, désormais, le prix de l'énergie photovoltaïque est proche, voire parfois inférieur, au prix de facturation de l'énergie traditionnelle, incitant les utilisateurs à investir sans même rechercher une quelconque subvention.

Les ressorts qui se cachent derrière cette chute sont de deux ordres :

- un gain de facteur d'échelle dans la production via l'automatisation, l'amélioration des méthodes ;

- les progrès technologiques en eux-mêmes : diminution des quantités de matière, diminution des consommables, amélioration des rendements, etc.

C'est ce dernier ressort que nous allons analyser en détail et nous allons voir quelles ont été les améliorations majeures et celles qui restent devant nous. Il s'agit bien sûr de souligner ici l'apport de la recherche et développement dans ce processus.

Les technologies photovoltaïques en présence

Les modules plan

Sur le marché il y a actuellement deux familles de technologies en compétition :

- les modules à base de silicium cristallin,
- les modules à base de couches minces.

Et parmi les couches minces, deux types de matériaux sont utilisés : d'une part les semi-conducteurs composés de type chalcogénures comme le CdTe ou les chalcopyrites de type $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ dits CIGS, avec substitution totale ou partielle de l'In par le Ga et du Se par le S et, d'autre part, le silicium hydrogéné utilisé sous sa forme amorphe uniquement ou en association avec du silicium micro-cristallisé (dit micro-cristallin).

Les modules au silicium cristallin représentent 85 % des parts de marché, part qui reste stable dans le temps.

Le photovoltaïque concentré

La concentration de l'énergie solaire pour augmenter les rendements de conversion et diminuer l'impact du prix des cellules photovoltaïques n'est pas une idée nouvelle, mais elle suscite un regain d'intérêt en raison de la disponibilité des cellules multi jonctions à base de matériaux III-V mises au point pour les

satellites. Ces cellules sont chères mais extrêmement performantes puisque les rendements de cellules commerciales approchent les 40 % sous concentration. Ces systèmes nécessitent le recours à des optiques de concentration et à des systèmes très précis de suivi (tracking) du soleil. Ne captant que le rayonnement direct, ils ne sont adaptés qu'aux pays à fort taux d'ensoleillement direct, donc les pays du sud.

La courbe d'apprentissage des rendements de conversion

Le rendement de conversion, même s'il doit être aussi associé au coût de fabrication pour que l'on puisse statuer sur la compétitivité d'une technologie donnée, est un indicateur essentiel des progrès technologiques.

Il est en fait d'une importance de plus en plus grande au fur et à mesure que la part du coût des modules dans le coût global du système baisse. En effet, une bonne part des coûts d'installation et des coûts des matériaux support est proportionnelle à la surface installée. Comme ces coûts baissent moins vite que celui des modules, le rendement de conversion, intervient in fine comme un facteur important de baisse de coût du système final.

La figure 1 donne l'évolution des rendements records en laboratoire pour les différentes technologies. On y constate

Figure 1. Évolution des rendements record en laboratoire par technologie (source : NREL).

que les progrès sont continus et relativement lents quelle que soit la technologie et que les technologies actuellement sur le marché sont relativement anciennes.

En effet, si la gamme des matériaux semi-conducteurs adaptés au spectre solaire est relativement large, obtenir une bonne cellule suppose une quantité très réduite de défauts dans le volume ou aux interfaces et donc une très haute qualité des matériaux et des dispositifs. Il faut donc beaucoup d'efforts de recherche pour cette maîtrise et ensuite beaucoup d'efforts pour transposer cela, à très bas coût, en production.

L'état de l'art et les perspectives par technologies

Le silicium cristallin

Le silicium cristallin reste le matériau de prédilection pour le photovoltaïque car il permet d'obtenir de très bons rendements (jusqu'à 20 % pour les modules commerciaux) et il est aussi réputé pour donner les modules les plus fiables. La chaîne de fabrication du silicium cristallin

Tableau 1. La feuille de route du matériau silicium.

Echéance	2008-2013	2013-2020	2020-2030
Consommation	5 g/Wc	< 3 g/Wc	< 2 g/Wc
Coût feedstock	15-25 €/kg	13-20 €/kg	10-15 €/kg
Épaisseur wafers	< 150 µm	< 120 µm	< 100 µm

est néanmoins complexe : purification du métal de base, cristallisation en lingots mono- ou poly-cristallins, sciage en wafers, fabrication des cellules et encapsulation des modules avec connexion des cellules.

Environ la moitié du coût d'un module vient du coût du wafer et il est donc essentiel d'en diminuer le coût sans perdre en qualité. L'essentiel de l'effort porte ici sur la diminution du coût de la purification [1] (utilisation de lit fluidisé pour le cracking du chlorosilane, recours aux méthodes de purification par les voies métallurgiques) et sur la diminution de la quantité de silicium par Wc (augmentation de la taille des lingots, diminution des pertes au sciage et de l'épaisseur des wafers). Le tableau 1 résume la feuille de route dans ce domaine.

Outre la réduction du coût, ces évolutions auront un impact aussi très positif

sur la réduction de la consommation énergétique lors de la fabrication.

À terme, on espère la totale suppression du sciage en utilisant des méthodes de tirage ou de mise en forme directe sous forme de lames ultraminces.

L'amélioration du rendement des cellules et des modules est une autre piste majeure pour la réduction des coûts. Il s'agit d'atteindre progressivement des rendements de cellules industrielles au-delà de 21 % tout en gardant un très bas coût de fabrication, de l'ordre de 10 à 20 cts d'€ par Wc. Les clefs sont ici d'agir sur les différentes causes de pertes résiduelles [2] :

1. pertes optiques par diminution des effets d'ombrage des métallisations de surface ou de la réflectivité,
2. pertes dues à la recombinaison des porteurs soit aux interfaces, soit dans

le volume en raison de la présence résiduelle de défaut,
3. et enfin les pertes ohmiques dans les conducteurs et aux interfaces.

Les nouvelles architectures de cellules (cellules à contacts inter-digités en face arrière [3], cellules dites à hétérojonctions [4]) ciblent de différentes façons la réduction de ces pertes résiduelles (*figures 2a et 2b*). Des rendements de cellules de laboratoire au-delà de 24 % et de modules commerciaux au-delà de 19 % sont là pour montrer la pertinence et le potentiel de ces nouvelles approches.

Les couches minces

Les couches minces suivent une courbe d'apprentissage parallèle et font l'objet aussi de très nombreux développements.

Le CdTe est une technologie assez ancienne mais qui a fortement progressé récemment en termes de part de marché. Le matériau est déposé par évaporation (*closed space sublimation*). Les rendements des modules sont de l'ordre de 12 % en 2013 mais avec un coût faible de 50 cts d'Euro/Wc. On s'attend à des progrès sur le rendement mais avec une marge inférieure à celle des technologies concurrentes. La concurrence avec le silicium et la présence de cadmium orientent naturellement la technologie vers le marché des grandes centrales au sol.

Le CIGS (chalcopyrites) est la technologie la plus récemment introduite. Des rendements de conversion de plus de 20 % ont été obtenus en laboratoire sur de petites cellules. C'est donc la technologie couches minces sur laquelle reposent le plus d'espoirs même si sa part de marché reste modeste. Pas moins de quatre techniques de dépôt sont utilisées : des techniques de dépôt sous vide par co-évaporation ou par pulvérisation cathodique, l'électrodépôt et les techniques d'impression à partir d'encre contenant les éléments actifs. Les rendements des meilleurs modules commerciaux de grande taille s'approchent de 14 %, confirmant le grand potentiel de cette technologie encore jeune.

L'usage de métaux rares, indium, gallium et tellure, pour ces couches minces suscite des interrogations sur la capacité

Figure 2. Les architectures de cellule silicium à hautes performances. **a.** Cellule à contacts arrière inter-digités. **b.** Cellule à hétérojonction.

de ces technologies à couvrir les marchés futurs. En tout état de cause, les modalités de production à partir des sous-produits des mines de zinc et de cuivre pourraient être amenées à être remises en question. Pour résoudre cette difficulté (*figure 3*), les chercheurs expérimentent de nouveaux matériaux composés de plus en plus complexes comme la famille de la késtérite et en particulier le $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) avec lequel récemment des rendements de 11 % ont été obtenus en laboratoire [5].

La filière silicium couche mince hydrogéné est la plus ancienne des filières couches minces. Des progrès ont été réalisés récemment en particulier avec l'introduction de cellules tandem associant une jonction dans le silicium amorphe hydrogéné et une jonction dans un silicium microcristallin hydrogéné qui capte les photons de plus faible énergie pour lesquels le silicium amorphe est mal adapté. Les couches sont déposées par dépôt chimique en phase vapeur activé par plasma (PECVD : *plasma enhanced chemical vapour deposition*).

Malgré ces avancées techniques, les rendements des modules commerciaux plafonnent vers 10 %, ce qui empêche un décollage de cette technologie malgré les avantages qu'elle offre à la fois dans la simplicité de mise en œuvre et dans l'absence de risque de pénurie de matière.

Plus en amont, des progrès très importants ont été faits récemment dans le domaine des cellules photovoltaïques à base de matériaux organiques. Deux concepts prévalent ici :

- Les cellules dites à colorant [6] dans lesquelles le colorant agit pour la conversion des photons en excitons ; des matériaux inorganiques de part et d'autre du colorant, donneurs et accepteurs d'électrons, séparent les charges.

- Les cellules utilisant deux matériaux organiques conducteurs [7] respectivement donneurs et accepteurs et qui sont des polymères ou des macromolécules. Ce concept profite des découvertes sur la physique des polymères conducteurs datant des années 80 ; ces matériaux sont déposés ou par voie gazeuse ou par impression.

Dans les deux cas les rendements de conversion bien qu'encore plus faibles que pour les technologies classiques progressent rapidement (de l'ordre de 11 %). Les efforts portent aussi en parallèle sur l'augmentation de la durabilité. Si sur le long terme ces technologies sont une alternative intéressante, les résultats actuels les cantonnent néanmoins à des marchés de niche.

Le photovoltaïque à forte concentration et les cellules III-V

La famille des matériaux III-V permet naturellement la conception et la réalisation de cellules multi-jonctions de hautes performances. Il est possible en effet d'ajuster à la fois la largeur de la bande interdite et le paramètre de maille des semi-conducteurs en changeant la composition

Figure 3. La complexification progressive des composés et des structures cristallines utilisées pour les cellules silicium : silicium (diamant), CdTe (zinc blende), CIS (chalcopyrite) et CZTS (késtérite).

Figure 4. Structure et schéma de fonctionnement des cellules multi-jonctions à base de matériaux III-V.

d'alliages utilisant la substitution d'éléments de la colonne III (Al, Ga, In) et de la colonne V (N, P, As, Sb). Usuellement, on part pour cela de substrats monocristallins de germanium sur lequel on épitaxie par des techniques de type MOCVD (*metal organic chemical vapor deposition*) en général deux ou trois jonctions successives dans deux ou trois matériaux différents. Une première jonction est souvent fabriquée dans le substrat de germanium lui-même (0,67 eV) et typiquement on utilise un composé InGaAs faiblement dosé en In (1,4 eV) puis ensuite un alliage GaInP (1,8 eV) [8] (figure 4).

Le rendement record dépasse désormais les 44 % (Solar Junction et NREL) en utilisant trois cellules en matériaux III-V de compositions nouvelles et un meilleur étagement des bandes interdites.

Les facteurs de concentration des systèmes commerciaux sont de l'ordre de 300 à 1000 et le rendement des systèmes complets dépasse 33 %.

Il existe plusieurs types d'optiques de concentration comme les lentilles de Fresnel fabriquées par embossage de polymères ou des paraboles avec concentrateurs secondaires de type optiques de Cassegrain. Les suiveurs mécaniques, leurs asservissements et les assemblages doivent permettre des alignements avec des précisions de la fraction de degré tout en restant compatibles avec des conditions d'environnement sévères (vent et températures).

Bien entendu ce type de technologie est réservé aux pays à très fort taux d'ensoleillement direct. Il existe un taux limite au-dessous duquel de tels systèmes sont

plus rentables. La possibilité d'augmenter les rendements tout en diminuant les coûts va rendre cette technologie très compétitive en particulier pour les centrales de taille petite ou moyenne.

Des prix très compétitifs d'ici 2020

L'énergie solaire est en plein développement et engagée dans une course à la réduction du coût et à l'amélioration de la performance. Les progrès déjà réalisés et la feuille de route permettent d'envisager d'arriver progressivement d'ici 2020 à des coûts de l'énergie très compétitifs. Les technologies basées sur les matériaux déjà connus ont encore une forte capacité à progresser, mais ceci nécessite en même temps des innovations en continu et une capacité à transférer ces résultats de recherche dans une production de masse à très bas coût.

Références

- [1] A.F.B. Braga *et al.*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells (2007)
- [2] M.A. Green, High Efficiency Silicon Solar Cell Concepts, in Practical Handbook of Photovoltaics, T. Markvart and L. Castaner (Eds), Elsevier, Oxford, 2003, pp. 251-278
- [3] P. Cousins *et al.*, Generation III: Higher Efficiency at lower cost, 37th IEEE PVSC
- [4] Mishima *et al.*, Solar Energy Materials & Solar Cells **95**, 18-21 (2011)
- [5] T.K. Todorov *et al.*, Adv. Mater. **22**, 1-4
- [6] U. Bach *et al.*, Nature **395**, 583-585
- [7] A. Facchetti, Chem. Mater. **23** (2011)
- [8] H. Cotal *et al.*, Energy Environ. Sci. **2**, 174-192 (2009)

Outils adaptés à la mesure de LED

CL-500A

Spectroradiomètre compact et portable

Mesure : le spectre, l'éclairement, la couleur, la température, l'IRC, la pureté, la longueur d'onde dominante...

Caractéristiques
Conforme aux normes DIN et JIS, Performant, Facile à utiliser, Mode autonome ou avec ordinateur, Très bon rapport qualité/prix...

OL 770

Spectroradiomètre rapide et précis

Mesure : le flux total énergétique, lumineux et spectrique, l'intensité lumineuse et énergétique, la longueur d'ondes dominante et le pic de longueur d'onde, la pureté spectrale, la température de couleur, l'IRC, les coordonnées chromatiques

Sciencetec, c'est aussi :
Sources de référence
Photomètres
Luxmètres
Chromamètres
Vidéocolorimètres

info@sciencetec.fr / www.sciencetec.fr
01.64.53.27.00