

# OÙ EN EST LA CONVERSION photovoltaïque de l'énergie solaire ?

Daniel LINCOT

CNRS, Institut Photovoltaïque d'Ile-de-France,  
30 route départementale 128, 91120 Palaiseau  
[daniel.lincot@ipvf.fr](mailto:daniel.lincot@ipvf.fr) - [www.ipvf.fr](http://www.ipvf.fr)

Le photovoltaïque poursuit sa progression dans le secteur de l'énergie avec une capacité installée au niveau mondial qui a pratiquement doublé entre 2015 et 2017 (415 GW fin 2017 contre 235 GW fin 2015 [1,2]) et devrait atteindre près de 500 GW fin 2018. En 2017, les nouvelles installations ont atteint près de 100 GW, dont 53 en Chine, et concernent de plus en plus de pays et de régions du monde, en particulier l'Inde, l'Amérique latine, l'Australie, au-delà de ses bases traditionnelles en Europe, au Japon et aux États-Unis. La barre symbolique du terawatt devrait être atteinte au début de la prochaine décennie, avec des volumes d'installations annuels qui pourraient atteindre plusieurs centaines de GW.

La figure 1 présente une photo d'une ferme photovoltaïque, construite en plein désert d'Atacama, où le photovoltaïque se développe de façon accélérée et très bien planifiée. En France, la puissance installée est maintenant de 8 GW, avec 875 MW installés en 2017, notons que les Pays-Bas ou le Chili font presque aussi bien (853 MW et 668 MW respectivement) [2]. La tendance générale est à l'augmentation des prévisions au niveau mondial et à la mise en place de plans volontaristes. Notons par exemple en France le plan solaire du gouvernement visant à atteindre 32 % d'énergies renouvelables en 2030 (contre 22 % aujourd'hui), ou l'annonce d'EDF prévoyant d'installer 30 GW de photovoltaïque en 2035 ; et au niveau international, l'Alliance Solaire Internationale, lancée lors de la COP21 par l'Inde et la France,

et qui regroupe aujourd'hui près de 121 pays, avec l'objectif de mobiliser 1000 milliards de dollars d'ici 2030. Dans le cadre de ce plan, l'Inde vise par exemple l'installation de 100 GW de photovoltaïque d'ici 2022, avec déjà 18,3 GW fin 2017.

Ces éléments peuvent être ramenés de façon plus parlante à l'énergie électrique produite. Pour cela on introduit le facteur de capacité qui est la production ramenée à son équivalent en heures pleine puissance par rapport à la puissance théorique à 100 % (8760 h). On passe ainsi de 10 % dans le nord de l'Europe où 1 GW produira 876 GWh, à 30 % dans le désert d'Atacama où 1 GW produira 2,6 TWh. Avec une valeur moyenne de 12 %, ce sont 435 TWh/an, soit près de la consommation électrique française totale, qui proviennent de la capacité mondiale installée fin 2017. Cela correspondrait

**SCIENTEC**  
La Solution à vos mesures

**PHOTOMÉTRIE**  
Colorimétrie - Radiométrie  
GAMME COMPLÈTE  
D'APPAREILS PORTABLES



**Luxmètre IRC CL-70F**  
Efficace & performant  
Sources lumineuses et LED, Nombreux types de mesures...



**Photomètre Chromamètre Luminancemètre CS-150 ou LS-150**  
Précis & rapide  
Large plage de luminance...



**Spectroradiomètre CL-500A**  
Précis & performant  
Source LED/EL, Température de couleur, IRC...



**KONICA MINOLTA**



**Photomètre Chromamètre CL-200A**  
Polyvalent / léger  
Eclairage, R&D, Production...



**ScienTec c'est aussi, la distribution de :**  
Luxmètres  
Photomètres  
Chromamètres  
Luminancemètres  
Vidéocolorimètres  
Photogoniomètres  
Spectroradiomètres  
Sources de référence...





info@scientec.fr - 01 64 53 27 00 - www.scientec.fr



**Figure 1.** Ferme solaire Luz del Norte située dans le désert d'Atacama près de Copiapo. La région possède une des ressources solaires parmi les plus élevées au monde, avec près de 4 MWh de rayonnement direct reçu par an sur une surface normale au rayonnement. Celui-ci est pratiquement complètement direct (97 %). Cette ferme solaire de 141 MW est basée sur la technologie CdTe avec suivi selon un axe. Son facteur de capacité est de 30 %. L'électricité produite est acheminée par un réseau haute tension directement vers la zone centrale de Santiago, très peuplée. (Crédit photo : Daniel Lincot)

à 2,14 % de la consommation mondiale d'électricité selon l'AIE (contre 1,8 % fin 2016 avec près de 7,5 % en Allemagne, Grèce, Italie, 6 % au Japon, 2 % en France tandis que le Honduras bondit à la première place avec 12,5 % – exemple d'un pays présentant des capacités électriques préexistantes limitées) [2]. Cela donne une bonne indication du poids qu'a pris en quelques années le photovoltaïque.

Le moteur de ce développement accéléré est en fait passé de la conséquence de politiques de soutien (par les tarifs d'achat préférentiels par exemple) à une compétitivité sur le marché sans subvention. Depuis 2015, la baisse des coûts des matériels et des installations, ainsi que l'amélioration des performances de conversion se sont poursuivies, permettant d'atteindre des coûts de production de l'électricité compétitifs avec les moyens de production traditionnels. En 2016 par exemple en France, elle était descendue en moyenne à 62 €/MWh et dans d'autres pays du monde à 20 \$/MWh. Les prévisions aux États-Unis descendent même jusqu'à 11 \$/MWh en 2022. Le photovoltaïque est donc amené à prendre une part croissante dans la transition énergétique au niveau mondial [3].

## L'évolution des filières photovoltaïques dominantes sur le marché

Les filières photovoltaïques qui constituent le marché en 2017 restent inchangées depuis 2015 : il s'agit de la filière silicium en plaquettes (*wafers*), qui représente 95 % des capacités installées et des filières en couches

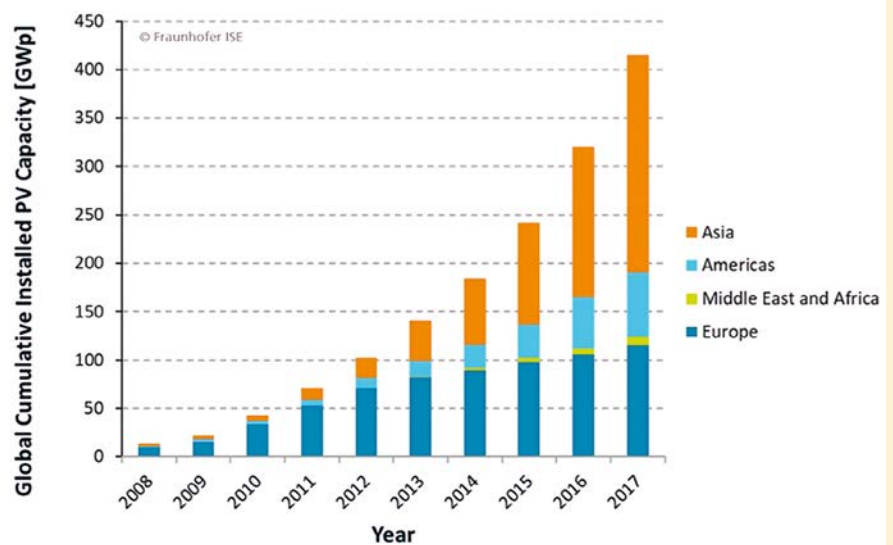
minces avec le trio CdTe, CIGS et silicium amorphe, représentant les 5 % restants [1].

### Le silicium

Au sein de la filière silicium on distingue les filières polycristallines et monocristallines. La première reste dominante avec 62 % des parts de marché, mais la tendance est cependant à l'augmentation de part de la filière monocristalline. On peut noter l'émergence d'une filière quasi-monocristalline dite « monolike » en particulier chez Photowatt en France. Sur le plan des performances moyennes l'amélioration est aussi frappante, avec en 10 ans un passage de 12 à 17 % de rendement module. Le haut de gamme monocristallin est maintenant à 21 % avec un record à 24,4 %.

### Les couches minces

Du côté des couches minces, elles maintiennent leur part de marché globalement (4,5 GW) mais avec une évolution marquée par la progression de la filière CIGS qui s'approche de la filière CdTe qui reste dominante, et surtout par la décroissance continue de la filière silicium amorphe. Tandis que pour la filière CIGS plusieurs nouveaux producteurs (en particulier



**Figure 2.** Évolution de la puissance photovoltaïque installée au niveau mondial suivant les différentes zones géographiques. (Source : ISE Fraunhofer PV report 2018 [1]), figure protégée par le droit d'auteur et non couverte par la licence Creative Commons.





Vous aider à construire  
 Votre futur

INDUSTRIE

ENGINEERING



Solutions  
 standards

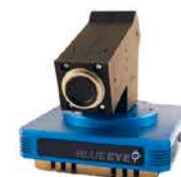
Projets  
 customs

Spectral Solutions  
 By Ardop



Spectromètres  
 Compacts

Spectromètres  
 FTIR



Caméra  
 multispectrale

Caméra  
 «Pushbroom»  
 spectrale



Caméra Snapshot  
 spectrale

Caméra Qalif  
 spectro



+ 33 6 49 54 52 94

www.ardop.com  
 sales@ardop.com

TYPE DE CELLULE	RENDEMENT (%) AOÛT 2015	RENDEMENT (%) JUILLET 2018
Multijonctions sous concentration (4 jonctions)	46	46
Tandem sous éclairage standard	31,1	32,8
GaAs monocristallin	28,8	28,9
Silicium monocristallin	25,6	26,6
CIGS	21,7	22,9
CdTe	21,5	22,1
Silicium polycristallin	20,8	22,3
Perovskite hybride (non stabilisée)	20,1	23,3
Couches minces Si	13,6	14
Cellules organiques	11,5	12,6
Cellules à particules quantiques	9,9	13,4

**Tableau 1.** Évolution des rendements record des cellules photovoltaïques sur 3 ans, entre août 2015 et juillet 2018 d'après les données du NREL [4].

chinois) font leur entrée aux côtés du japonais Solar Frontier, la filière CdTe reste dominée par First Solar (USA). Cette dernière devrait rebondir dans les années à venir avec l'annonce de l'augmentation à 6 GW des capacités de production de First Solar. Notons que les performances moyennes des modules CdTe sont passées de 9 à 16 % en 10 ans (annoncées à 17 % pour 2018). Un module record CIGS est à 18,7 % (Solibro).

L'amélioration des performances des modules est souvent sous-estimée au profit de la réduction des coûts, et il est important de montrer que toutes ces filières, à l'exception de la filière silicium amorphe pour l'instant, ont le potentiel d'atteindre les 20 % de rendement moyen au cours des prochaines années.

## La recherche

Sur le front de la recherche, la compétition continue et s'amplifie. Nous avons déjà évoqué dans l'article de 2015 (voir *Photoniques* n° 78) le développement foisonnant des recherches de rupture visant à augmenter les rendements record des différentes filières existantes, et à en faire émerger de nouvelles – un développement remarquablement illustré par la fresque éditée par le Laboratoire National sur les Énergies Renouvelables des États-Unis (NREL) [4]. La *figure 5* reprend

l'état actuel de la fresque en mettant l'accent sur les évolutions depuis 2015. Celle-ci compte pas moins de 24 filières différentes.

Le *tableau 1* extrait les évolutions des rendements record pour les filières les plus représentatives.

## Les cellules silicium

Concernant les cellules au silicium, leur rendement record atteint maintenant les 26,6 % [5], soit une progression de 1 % par rapport au record de 2015. C'est tout à fait remarquable lorsque l'on considère que le rendement théorique, dit de Shockley-Queisser (SQ), est de 29,1 %, soit une valeur à 8 % du record. Pour cela les deux meilleures technologies, à contact arrière et à hétérojonction, ont été combinées par une équipe de Kaneka, qui a également optimisé la passivation électronique des interfaces. Des progrès importants ont été réalisés dans ce domaine avec l'introduction de nouvelles couches de passivation, à base de nitrure ou d'oxydes, plus efficaces et mettant en œuvre également des couches à effet tunnel et des contacts sélectifs (*figure 6*). L'équipe prévoit de porter ce rendement à 27,1 % en corrigeant des pertes identifiées.

Les progrès se sont également portés sur les cellules polycristallines avec une réduction des pertes aux joints de grains, portant le rendement à 22,3 % (ISE Fraunhofer [1]).

TOP 10 COUNTRIES IN 2017				TOP 10 COUNTRIES IN 2017			
1		China	53 GW	1		China	131 GW
2		USA	10,6 GW	2		USA	51 GW
3		India	9,1 GW	3		Japan	49 GW
4		Japan	7 GW	4		Germany	42 GW
5		Turkey	2,6 GW	5		Italy	19,7 GW
6		Germany	1,8 GW	6		India	18,3 GW
7		Australia	1,25 GW	7		UK	12,7 GW
8		Korea	1,2 GW	8		France	8 GW
9		UK	0,9 GW	9		Australia	7,2 GW
10		Brazil	0,9 GW	10		Spain	5,6 GW

**Figure 3.** Classement par pays en 2017 de la puissance PV cumulée et installée en 2017. (Source : AIE-PVPS 2017 [2], figure protégée par le droit d'auteur et non couverte par la licence Creative Commons)

### Les cellules couches minces

Avec un rendement récemment porté à 22,9 % (Solar Frontier) les cellules en couches minces CIGS continuent de progresser et d'engranger les bénéfices introduits par l'introduction de nouveaux éléments alcalins (K, Rb, Cs) à la surface du CIGS durant l'élaboration, qui réduit également les recombinaisons de porteurs. La compréhension des phénomènes mis en œuvre est au cœur des efforts de recherche au niveau international. Cette maîtrise de plus en plus importante de l'élaboration du CIGS débouche également sur un intérêt renouvelé des dépôts à basse température compatibles avec des supports polymères. C'est ainsi qu'en deux ans les équipes de l'IPVF ont pu atteindre 18 % de rendement pour des cellules sur polyimide élaborées à 450 °C (M. Balestrieri et al., *Journal of Photovoltaics* 8, 1343 (2018)). Ces travaux s'intègrent dans une nouvelle direction pour le photovoltaïque, sur support légers, voire ultralégers et flexibles, pour des applications spécifiques dans l'habitat ou la mobilité par exemple.

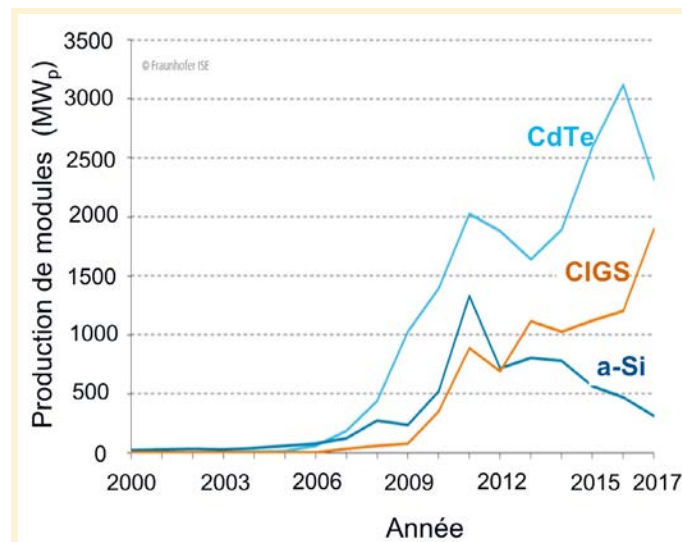
Les cellules CdTe ne sont pas en reste avec une progression à 22,1 %. Là aussi de nouveaux progrès ont été faits sur le plan de la physico-chimie du matériau et des interfaces, que nous avons déjà illustrés en 2015. La nouvelle rupture intervenue depuis est celle de l'ajout de sélénium au sein du CdTe qui permet la réalisation de gradient de composition favorisant la

collecte du photocourant. On peut noter la similitude de plus en plus grande avec les approches CIGS.

### Les cellules perovskites hybrides

La filière perovskite hybride, basée sur l'iodure de méthylammonium (MA) et de plomb (PbMAI<sub>3</sub>) poursuit sa progression spectaculaire. Déjà associée en 2015 à des performances remarquables pour une filière émergente née en 2012, avec le franchissement de la barre symbolique des 20 %, c'est maintenant la barre des 23 % qui vient d'être franchie ! Avec 23,3 % de rendement, les cellules perovskites dépassent même les autres filières couches minces, y compris le silicium polycristallin. Il faut cependant nuancer ce classement car ces résultats

restent encore associés à des dispositifs de petite dimension (quelques mm<sup>2</sup>) et ne présentent pas la stabilité et la fiabilité dans le temps démontrées par les autres technologies. Cependant des progrès continus en matière de stabilité sont publiés, égalant ou dépassant désormais les 1000 heures de fonctionnement sous éclairage solaire standard notamment grâce à l'utilisation d'alliages de plus en plus complexes dits à cations et anions multiples. Pour continuer d'améliorer à la fois la fiabilité et les performances, les chercheurs portent également leurs efforts sur la structure des cellules pérovskites dans leur globalité car les interfaces pérovskites/matériaux transporteurs de charges sont identifiées comme la source de bon nombre de problèmes. Un axe de recherche très important consiste par ailleurs à transposer tous ces nouveaux résultats vers de grandes surfaces plus compatibles avec les standards industriels, avec de premiers résultats probants, comme par exemple une valeur de 13,8 % stabilisée obtenue sur 144 cm<sup>2</sup> (aire d'un wafer de silicium) par le consortium Solliance aux Pays-Bas en avril 2018. Cette filière impose une nouvelle classe de matériaux semi-conducteurs à propriétés modulables comme le sont les matériaux à base de GaAs, de CIGS, de CdTe et même de silicium. Ce qui pourrait faire la différence dans quelques années, si les critères de stabilité et de fiabilité sont levés, c'est l'irruption d'une nouvelle



**Figure 4.** Évolutions comparées des filières couches minces CdTe, CIGS et Si amorphe sur le marché. (Source : PV Report 2018, ISE-Fraunhofer [1], figure protégée par le droit d'auteur et non couverte par la licence Creative Commons)



filrière sur le marché potentiellement à très bas coût et à haut rendement, basse température et donc compatible avec des supports plastiques.

### La course au rendement : les multijonctions en première ligne

Alors que l'ensemble des cellules à simple jonction s'achemine peu à peu vers la limite de Shockley-Queisser, plafonnant à 33,7 % pour un gap autour de 1,3-1,5 eV, ce qui nécessitera de plus en plus d'efforts<sup>1</sup>, il existe une marge de progression considérable (jusqu'à 65 % sous éclairage standard) avec l'utilisation de multijonctions. Il passe à 46 % avec deux jonctions, 52 % avec trois, 56 % avec quatre, 58,4 pour cinq et 60 % avec six. D'ores et déjà la fresque du NREL atteste de cette potentialité en affichant 32,8% pour les doubles jonctions (tandem) en progression de 1,7 % par rapport à 2015, 37,9 % pour les triples jonctions et même 38,8% pour les quintuples jonctions. Récemment, à la dernière conférence mondiale sur l'énergie solaire photovoltaïque en juin 2018, la communication *outstanding* retenue par les experts confirmait l'attractivité de cette approche en primant les travaux du NREL sur l'élaboration d'une cellule

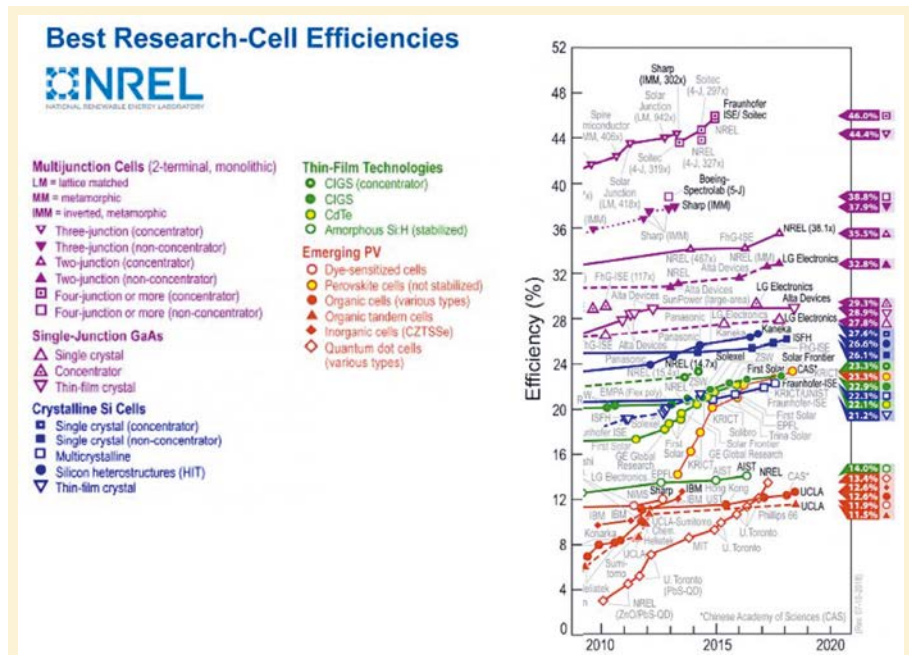


Figure 5. Fresque des rendements record en laboratoire des différents types de cellules photovoltaïques. (Source : NREL [4], figure protégée par le droit d'auteur et non couverte par la licence Creative Commons)

à six jonctions superposées allant de l'UV à l'infrarouge [6]. Même si le rendement obtenu reste modeste à 35,8%, la réalisation d'une telle jonction est une véritable prouesse scientifique et technologique, mettant en œuvre une maîtrise exceptionnelle des matériaux, de leurs interfaces, ainsi que des propriétés électriques et optiques imbriquées complexes. Les

autres paramètres de la cellule sont une tension de circuit ouvert de 5,3 V, un photocourant de 8,05 mA/cm<sup>2</sup> et un facteur de forme de 83,9 %. D'après les chercheurs, cette structure a le potentiel pour franchir la barre des 50 %.

Pendant au-delà de ces records qui ouvrent la voie mais restent encore inaccessibles en termes de coûts pour le photovoltaïque sur le marché, la vraie tendance qui se dégage de plus en plus est la mise en œuvre

<sup>1</sup> Le record toutes catégories des jonctions simples est détenu par les cellules au GaAs avec une valeur de 28,8 % qui est passée à 28,9 % en 5 ans (Alta Devices).

## Unmatched Positioning Performance




Three-dimensional vector accuracy error measured in the Z=0 mm XY plane

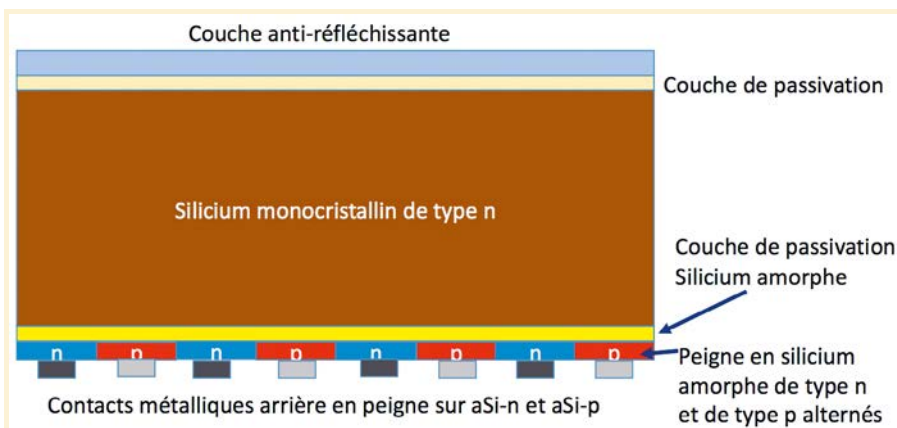
### HexGen® Hexapods by Aerotech... The next-generation in 6 degree-of-freedom positioning

HexGen® hexapods are ideal for large payload, high-speed, ultra-precise positioning. The HEX500-350HL provides unmatched positioning accuracy ( $\pm 0.5 \mu\text{m}$  linear,  $\pm 2.5 \mu\text{rad}$  angular) and positioning resolution (20 nm linear, 0.2  $\mu\text{rad}$  angular). Simply stated, HexGen hexapods are the highest performance hexapods on the market.

Contact an Aerotech application engineer or visit our website for more information on how Aerotech hexapods can improve your positioning application.

**AEROTECH** [www.aerotech.com](http://www.aerotech.com)  
+33 2 37 21 87 65

AT0118A-RAD-FR



**Figure 6.** Structure de la cellule solaire record silicium à 26,6 % [5]. Figure protégée par le droit d'auteur et non couverte par la licence Creative Commons.

de cellules tandem afin de porter le rendement des modules à plus de 30 % à un coût compétitif. Cet objectif a été popularisé en 2015 par la feuille de route 30×30×30 de l'IPVF, visant à 30 % de rendement module à 30 centimes par watt à l'horizon 2030. Pour cela la configuration-reine serait d'associer deux filières existantes « monojonctions » de façon à bénéficier de synergies en termes de procédés et de coût. Or les cellules silicium offrent justement d'emblée la possibilité de jouer le rôle de la cellule arrière, tandis que les cellules perovskites, qui ont naturellement un grand gap, pourraient jouer le rôle de cellule avant. Alors que les cellules perovskites ont encore des problèmes à régler, une course effrénée s'est engagée sur cette voie au niveau mondial, et les records tombent les uns après les autres. Le dernier en date concerne l'obtention d'un rendement de 27,3 % pour un tandem Si/perovskite par la startup Oxford PV (juin 2018), tandis que le consortium Solliance indique une valeur de 27,1 % (juillet 2018). Ces résultats ont une réelle valeur symbolique et marquent un cap car ils dépassent le rendement record d'une cellule au silicium simple. D'autres combinaisons sont en compétition, en particulier utilisant des cellules avant de type III-V (GaAs, GaInP) qui atteignent déjà 32,8 % [7]. On considère également des combinaisons CIGS/perovskite, silicium/CIGS grand gap, CIGS/CdTe, Si/CdTe et même perovskite/perovskite. Il s'agit vraiment d'une compétition mondiale nouvelle dont la fresque du NREL ne rend pas vraiment compte.

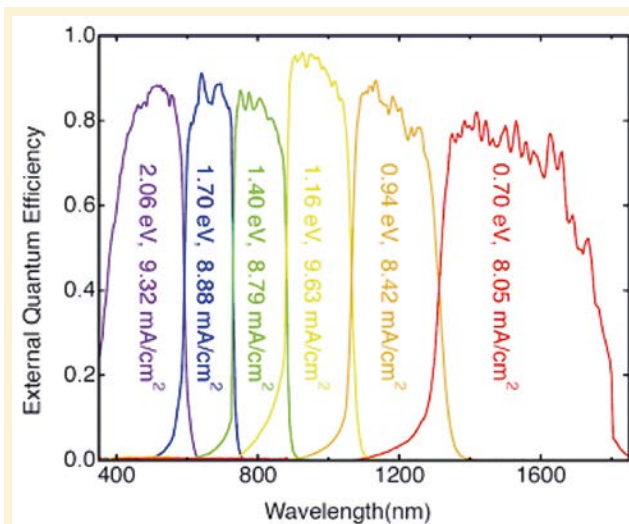
### Les nouveaux concepts

Quid des nouveaux concepts : plasmonique, photonique, particules quantiques, ultrahaute concentration... ? Ce domaine de recherche, beaucoup plus amont, n'est pas en reste comme le montre la progression des cellules solaires émergentes à particules quantiques dans la fresque du NREL qui affichent une progression soutenue allant jusqu'à 14 % maintenant. La plasmonique photonique progresse également en particulier dans le domaine des cellules à basse dimensionnalité, 1 D (nanofils), 2D (couches ultrafines) et 3 D (particules quantiques). Un résultat remarquable a été obtenu par l'équipe de Stéphane Collin (CNRS/C2N) en collaboration avec celle de Frank Dimroth à l'ISE Fraunhofer, avec les cellules ultrafines de GaAs (205 nm) présentant un rendement de 19,9 % grâce aux effets

photoniques des miroirs de Bragg en face arrière. Sa présentation par Hung Ling Cheng, doctorant, à la conférence mondiale a été primée par le prix de la meilleure présentation étudiante du thème Nouveaux Concepts (voir figure 8). De récentes avancées ont également eu lieu dans le domaine de la conversion par porteurs chauds assistée par piégeage optique avancé, avec l'obtention d'un prix de meilleur poster à la conférence mondiale PV par M. Giteau avec l'équipe de Jean-François Guillemoles (CNRS/IPVF/Next PV) en collaboration avec l'université de Tokyo (Prof. Okada, Next PV et RCAST) et l'équipe de Stéphane Collin (CNRS/C2N). Enfin, la très haute concentration, qui permet d'augmenter le rendement des cellules, bénéficie du développement du concept de microcellules. On peut aisément imaginer développer ce type de systèmes dans les régions à fort ensoleillement direct comme par exemple dans le désert d'Atacama (figure 1) où il atteint 97 % toute l'année !

### En conclusion

On pourrait penser qu'avec le niveau de compétitivité déjà atteint par la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire, le secteur photovoltaïque se contente d'améliorer les technologies existantes à base de silicium cristallin ou polycristallin et fasse passer au second plan les recherches sur d'autres filières ou d'autres concepts. Force est de constater que, non seulement ce



**Figure 7.** Réponse spectrale d'une cellule à 6 jonctions, lauréate du prix de la meilleure communication à la conférence mondiale photovoltaïque (Hawaii, juin 2018) [6]. (Crédit : Miles Steiner et al., NREL, figure protégée par le droit d'auteur et non couverte par la licence Creative Commons)





**Figure 8.** Remise des prix des meilleures présentations étudiantes à la 7<sup>e</sup> Conférence Photovoltaïque Mondiale (Hawaï, USA, juin 2018) pour chacune des thématiques du domaine. Le prix de la thématique « nouveaux concepts » (area 1 en haut de la liste) a été décerné à Hung Ling Cheng du CNRS - C2N (2<sup>e</sup> à partir de la gauche) pour ses travaux sur les cellules solaires ultrafines de GaAs. (Crédit photo : Daniel Lincot).

n'est pas le cas, mais qu'au contraire la montée en puissance de l'énergie solaire dans le secteur énergétique s'accompagne d'efforts accrus pour créer de nouvelles ruptures en matière de performances, d'applications et de coût. Et que cela produit déjà des effets, avec la montée en puissance des multijonctions, des couches minces et demain des nouveaux concepts autour de la photonique. Le prochain rendez-vous de la recherche PV en France

se tiendra lors des Journées Nationales du Photovoltaïque organisées par la Fédération de recherche en photovoltaïque du CNRS du 4 au 7 décembre 2018 à Dourdan [8].

### Remerciements

L'auteur remercie le Professeur Jacky Even du Laboratoire FOTON à Rennes pour sa contribution à la section sur les perovskites.

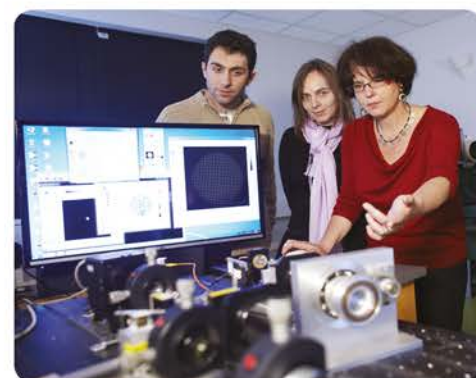
#### POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] Photovoltaic Report 2018, ISE Fraunhofer : [www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)
- [2] Snapshot 2018 of Global Photovoltaic Market, International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems (PVPS) : [www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org)
- [3] D. Lincot, Le nouveau paradigme de l'énergie photovoltaïque : de l'alimentation des satellites à celle de l'humanité, *Comptes Rendus Physique* **18** (2017) : 381. En open access. [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631070517300555](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631070517300555)
- [4] [www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart-20180716.jpg](http://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart-20180716.jpg)
- [5] K. Yoshikawa et al., Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%, *Nature Energy* **2** (2017) : 17032
- [6] M. Steiner et al., "Six Junction IMM Solar cell for high concentration", communication à la Conférence PV Mondiale 2018
- [7] E. Essig et al., Raising the one sun conversion efficiency of III-V/Si solar cells to 32,8% for two junctions and 35.9% for three junctions, *Nature Energy* **2** (2017) : 17144
- [8] Site des JNPV 2018 : <http://jnpv.geeps.centralesupelec.fr/index.php/les-jnpv-2018>

## FORMATION CONTINUE

Une nécessité  
pour les entreprises

Une mission majeure  
de l'Institut d'Optique



- Au catalogue ou sur-mesure
- Plus de 150 montages pédagogiques
- De l'initiation à la spécialisation
- Formateurs experts
- En anglais ou en français
- En France ou à l'étranger
- Liens forts avec l'industrie

- Infrarouge, optronique
- Instrumentation, composants, fabrication
- Conception optique
- Imagerie, mesure, communication
- Sources, éclairage, lasers, sécurité
- Mastère Spécialisé® ELS  
*Systèmes d'Éclairage Embarqué*

#### Nous contacter

Emilie Ericher

+33 1 64 53 32 36

[fc@institutoptique.fr](mailto:fc@institutoptique.fr)

CATALOGUE EN LIGNE  
[fc.institutoptique.fr](http://fc.institutoptique.fr)

