

# 16. Recherches avancées

---

*Sateesh KRRISHNAMURTHY, Open University, R.-U.*

## Attendus du cours

Après avoir étudié ce chapitre, l'étudiant devrait pouvoir comprendre :

1. L'état d'avancement des recherches sur les matériaux photovoltaïques et les technologies PV alternatives
2. Les principales caractéristiques des grandes installations PV
3. Les avancées dans la technologie des inverseurs

## Avancées dans le domaine des matériaux photovoltaïques

La consommation annuelle totale globale de toutes les formes d'énergie a augmenté de plus de dix fois pendant le 20ème siècle, et en 2011, la production énergétique et la consommation étaient proches respectivement de 547 et 549  $10^{18}$  J [1]. Les ressources énergétiques non-renouvelables telles que le charbon, le pétrole et le gaz ont plusieurs et très significatifs impacts nocifs sur l'environnement qui contribuent au changement climatique, par conséquent, il est urgent pour la transition de favoriser les sources d'énergie renouvelables telles que les énergies d'énergie solaire, éolienne, hydraulique, de marée et géothermiques. Durant ces dernières décennies les technologies d'énergie renouvelable, en particulier le solaire photovoltaïque se sont fortement développées. La demande toujours croissante en énergie et l'épuisement prévu des sources non-renouvelables, comme les combustibles fossiles, vers la fin du siècle a invité des chercheurs à développer l'énergie solaire comme forme d'énergie propre et abondante. Toute la contribution globale d'origine photovoltaïque était <1% en 2013 mais on prévoit de la voir grimper jusqu'à 16% d'ici 2050 [2]. Cependant, la technologie classique de silicium est confrontée à des défis non résolus inhérents aux propriétés matérielles, notamment l'efficacité théorique prévue de 33% et, en conséquence, l'efficacité de ces systèmes sont limitées par le matériau de base. Bien qu'il y ait eu des recherches et des développements considérables dans le domaine des cellules solaires de silicium pendant les décennies passées, leur efficacité augmente lentement. Afin de satisfaire les demandes d'énergie mondiale à l'horizon 2020 et au-delà, les chercheurs travaillent sur des technologies douces disruptives par rapport à la technologie conventionnelle de silicium.

La technologie de silicium de première génération domine actuellement le marché photovoltaïque du monde, étant employée dans plus de 90% des installations. La meilleure efficacité obtenue pour les cellules solaires de silicium est 25%, 22% pour des modules, dépendant en grande partie de la qualité du silicium utilisé. Ces dispositifs sont fiables et robustes, mais ils souffrent des inconvénients du coût de production élevé, de la qualité du montage dans les modules solaires et de la limite théorique d'efficacité de Shockley Queisser.

Les cellules de deuxième génération utilisent la technologie amorphe et en couche mince telle que le silicium amorphe, arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe), séléniure de cuivre-indium (Di) (CIGS) atteignant une efficacité de 21% [1] et abaissant des coûts de production. Les procédés complexes sous vide pour le traitement de matériaux, les traitements à hautes températures pour la fabrication des cellules solaires de la 2ème génération, aussi bien que (et d'une manière primordiale) la disponibilité des matériaux et par conséquent leur coût, les rendent moins attrayants pour la production à grande échelle. Cependant, les cellules solaires en couche mince de deuxième génération ont un marché de niche pour certaines industries, telles que des applications flexibles dans le domaine l'électronique.

Des cellules solaires de la 1ère à la 2ème génération, la réduction des coûts a été une étape vers la

bonne direction, mais les coûts ne sont pas encore assez bas pour un substantiel développement commercial.

Les cellules solaires de troisième génération qui sont basées sur les matériaux nanostructurés qui utilisent des techniques de fabrication peu coûteuses ont attiré plus d'attention dû au processus simplifié de fabrication, à la disponibilité des matériaux et à la compétitivité des coûts. Les cellules solaires de troisième génération se composent de différents types de dispositifs, tels que les cellules solaires photo-sensibilisées (DSSCs), les cellules organiques à base de polymères, les cellules solaires point quantique sensibilisées (QDSSCs), les perovskites et les dispositifs tandem multicouche avec du silicium amorphe ou du GaAs. Un des candidats principaux avec une augmentation drastique de l'efficacité est la perovskite qui a émergé comme alternative prometteuse due à sa rentabilité et rendement élevé.

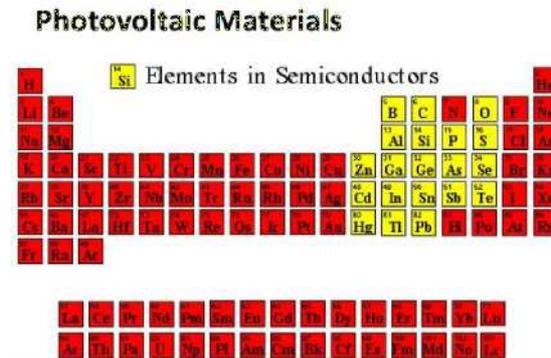


Figure 1. Les semi-conducteurs qui peuvent être employés comme matériaux de PV

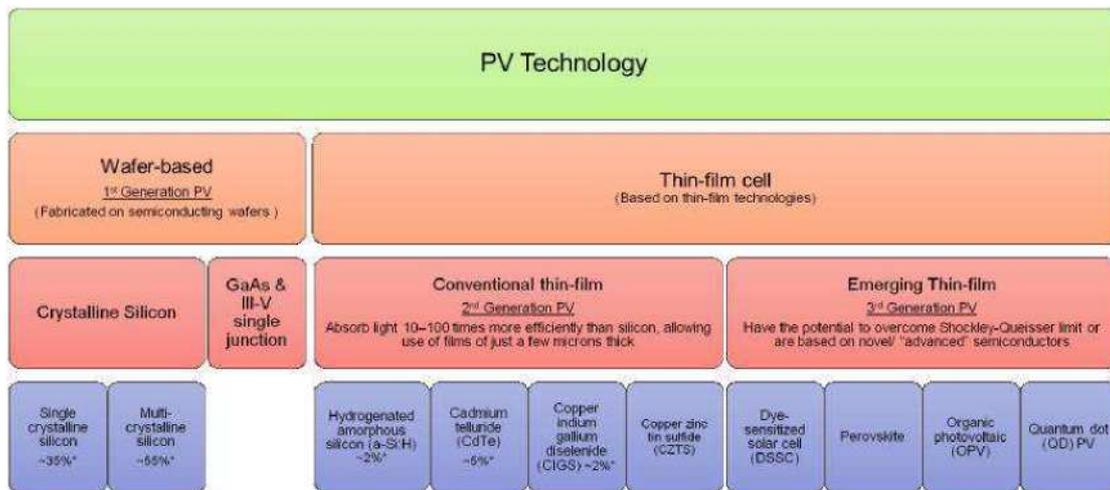


Figure 2. Différents générations de cellules solaires.

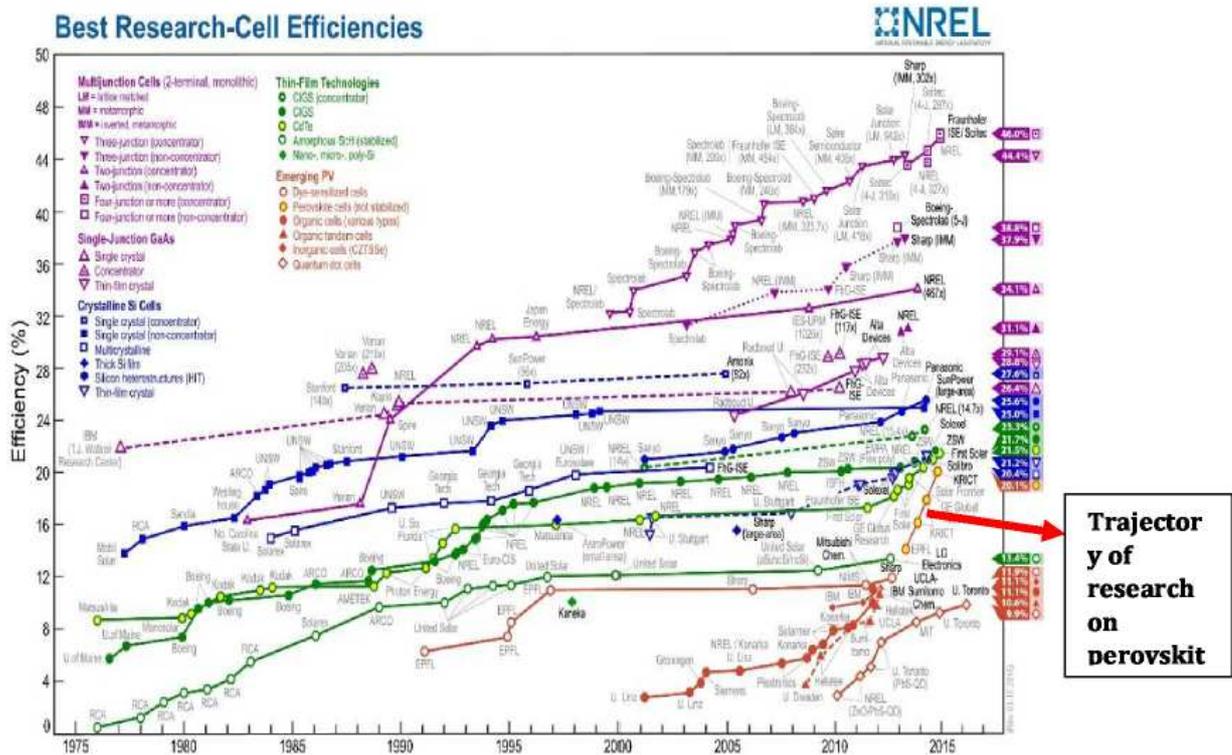


Figure 3. Historique des progrès en termes d'efficacité [1].

La figure 3 montre l'efficacité énergétique de différents matériaux de cellules solaires. On peut noter la croissance récente de disponibilité des matériaux à base de perovskite et leur efficacité en pleine évolution, justifiant qu'autant d'investissements actuellement sont faits en cette technologie.

Les cellules solaires de perovskite (PSC) sont relativement une nouvelle technologie, qui a actuellement produit un énorme intérêt dû à leur multitude de propriétés fascinantes et à la perspective d'une alternative viable et peu coûteuse au silicium. Les PSC Inorganique-organiques hybride avec des nanostructures à deux dimensions poussent la science et la technologie au-delà de l'ère du silicium, transférant progressivement ces matériaux de la recherche théorique à l'industrie et, finalement, de société. Tout récemment, la recherche intense dans ce domaine a permis à l'efficacité de ces dispositifs d'atteindre 20% en de peu d'années comme on peut le voir en Fig. 3. Malheureusement, la commercialisation de ces systèmes est encore lointaine en raison des défis inhérents liés aux molécules organiques dans ces dispositifs hybrides de perovskite.

Le développement des cellules solaires de perovskite gagne du terrain par rapport aux technologies conventionnelles de pile solaire en silicium, cristallin ou amorphe, aussi bien que sur les systèmes photovoltaïques organiques naissants. C'est en grande partie dû à leurs propriétés uniques, peu coûteuses à produire, et à la disponibilité des matériaux hybrides organique-inorganiques nécessaires pour leur synthèse. Le concept de l'incorporation des perovskites comme sensibilisateur a émergé du domaine des DSSCs, où un colorant photosensible adsorbé sur la surface d'un conducteur n-type mésoporeux et noyé dans un électrolyte redox, fonctionne efficacement comme une pile solaire.

### Systemes PV à concentration

Indépendamment des couches minces à panneau plat ou flexibles, une autre manière d'obtenir l'énergie de la lumière du soleil est d'utiliser des miroirs ou des lentilles de Fresnel pour concentrer le rayonnement solaire entrant sur les cellules. Cette forme a un avantage unique ; selon le taux de concentration, la surface nécessaire à puissance égale est beaucoup plus faible, variation entre deux à plusieurs centaines ou même mille fois moins. Le système de concentration doit avoir une ouverture égale à celle d'une rangée équivalente de capteurs plans pour capter la même quantité d'énergie.

Les systèmes avec les taux de concentration les plus élevés emploient des capteurs, des moteurs et des commandes pour leur permettre de pister le Soleil dans les deux axes (azimut et altitude), assurant

que les cellules reçoivent toujours la quantité maximum de rayonnement solaire. Il est important de noter que les cellules sont exposées à des températures beaucoup plus élevées que dans une rangée de capteurs plans, qui est une raison pour laquelle des cellules III-V à multi-jonctions sont employées. Les systèmes avec des taux de concentration inférieurs suivent le Soleil seulement sur un axe et peuvent avoir des mécanismes de suivi plus simples.

La plupart des concentrateurs peuvent seulement utiliser le rayonnement solaire direct. Ceci a un effet négatif dans la plupart des pays européens où presque la moitié du rayonnement solaire est diffus, mais dans les climats avec des proportions plus élevées de rayonnement solaire direct ils peuvent être très efficaces.

### Sphères de silicium

Dans les années 70, la société américaine Texas Instruments (TI) a développé une manière ingénieuse de rendre l'utilisation de cellules PV minuscules, utilisant des sphères de silicium enduit, de l'ordre du millimètre de diamètre, incorporé à intervalles réguliers entre les feuilles minces de papier d'aluminium. Cette approche a récemment encore été développée par l'entreprise japonaise Clean Venture 21 (CV21) en enfermant chaque sphère minuscule de silicium dans sa propre coupelle en hexagonale de micro-rélecteurs en aluminium, qui concentre la lumière sur la sphère et réduit le montant total de silicium exigé, en comparaison des cellules de silicium cristallines conventionnelles, comme présenté en Fig. 4 [3]. Cette technologie est actuellement en début de commercialisation.

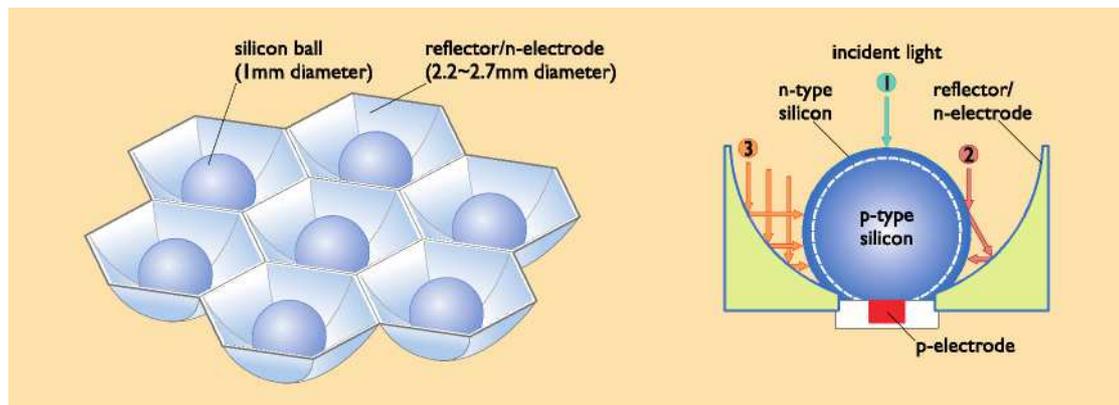


Figure 4. Principe de la technologie sphérique de PV développée par CV21. Des sphères minuscules du silicium cristallin enduit sont enfoncées dans des micro-rélecteurs hexagonaux

### Impact des progrès de la technologie PV

Les progrès de la technologie PV présentera plus de moyens d'intégrer le PV dans les bâtiments résidentiels et commerciaux, aussi bien que dans des applications de transport. L'enveloppe entière d'un bâtiment a ainsi le potentiel de devenir un groupe électrogène.

Le PV en couche mince peut être intégré dans le vitrage des fenêtres, des lucarnes, des façades et des pignons de bâtiment. La transmittance de verre incorporant le PV en couche mince peut être variée pour réduire la lumière du soleil entrante et pour briller juste comme l'aspect traditionnel de fenêtre.

Le verre PV peut également être produit pour l'usage comme verre de parement et transforme effectivement l'enveloppe entière d'un bâtiment en générateur de courant électrique. Le toit d'un bâtiment est l'endroit traditionnel pour installer des capteurs PV.

Pour les toits plats sur les bâtiments commerciaux, les fabricants expérimentent d'intégrer le PV dans les matériaux de toiture traditionnels qui peuvent être installés directement par un entrepreneur de toiture exactement de la manière dont les matériaux de toiture sont actuellement installés. Pour les toits inclinés, des bardeaux de PV sont produits en employant le silicium cristallin ou la technologie en couche mince. Ces bardeaux sont faits pour ressembler aux bardeaux d'asphalte ou de bois. Des panneaux en couche mince et les recouvrements des panneaux PV sont produits pour s'emboîter dans la toiture en métal qui peut être fournie dans une série de couleurs pour fournir une installation

esthétiquement satisfaisante.

## Progrès dans le domaine des installations de grande taille

Bien que les projets de PV augmentent rapidement, ils ne sont pas encore comparables aux technologies conventionnelles de production d'énergie à grande échelle. Le PV a encore très peu d'applications à grande échelle. Cependant, les progrès des technologies de centrales PV ont permis à différents pays de commencer à installer des centrales à grande échelle.

La plus grande usine PV au monde construite jusqu'ici est le parc solaire du Gujarat, en Inde, d'une puissance de 600 MW. La plus grande usine aux Etats-Unis est Solar Star avec 579 MW. La plus grande usine de PV en Europe, la ferme solaire de Cestas en France a une capacité de 300 MW. Au Maroc, à Ouarzazat, aux portes du désert, la municipalité envisage la création d'une installation couplant énergie solaire, éolienne et hydraulique qui pourrait à l'horizon 2020 fournir la moitié de l'électricité consommée au Maroc. C'est l'un des projets phares du Maroc pour l'exploitation du désert, avec à terme une installation de 580 MW.



Figure 5 : Le site de Gujarat, Inde

## Applications des installations à grande échelle

Les installations PV à grande échelle ont progressé en raison des besoins croissants tels que : installations connectées au réseau, électrification de villages isolés, systèmes de sauvegarde pour les télécommunications, installations de dessalement et de pompage, froid pour le stockage d'aliments et de médicaments...Nombre de ces applications sont liées à l'isolement et un enjeu important est celui du stockage de l'électricité. Il faut aussi noter que de telles installations de grandes dimensions sont moins rentables que de plus petites connectées au réseau. Ceci est dû au fait même d'être connecté, ce qui permet toujours d'injecter toute l'électricité produite sur le réseau, et donc, d'optimiser le coût de cette électricité.

Inversement, une installation isolée est dépendante de la demande de puissance, et par conséquent, ne pas pouvoir stocker la puissance excessive fait qu'elle ne peut pas être utilisée.

## Avancées dans la technologie des inverseurs

Globalement, scientifiques et ingénieurs essayent de déterminer comment adapter au mieux le pourcentage croissant de la production d'électricité photovoltaïque solaire injecté dans les réseaux électriques. On manque de certitudes sur les effets des niveaux élevés d'injection d'électricité renouvelable variable sur la fiabilité des systèmes, la qualité de l'énergie, et la sûreté des ouvriers et de l'équipement, mais les avancées récentes en technologie d'inverseur donnent aujourd'hui des outils valables pour gérer ces aspects de gestion des réseaux. Toutes les sources d'énergie renouvelables, et chaque forme de stockage de l'énergie, produisent du courant continu (DC) et une puissance de sortie à fréquence variable. Toute la puissance de ces sources doit passer par un convertisseur de fréquence (CC en CA ou CA en CA) afin d'alimenter le réseau en courant alternatif à fréquence constante et stable. Cette étape supplémentaire de conversion de puissance présente des pertes supplémentaires, et donc a un coût et de puissance. Du côté positif, le besoin de conversion de fréquence a eu comme conséquence une rapide croissance du marché des générateurs électroniquement couplés (ECG5) reliés au réseau, dont les possibilités de réglages sont plus flexibles comparées à ceux des générateurs tournants conventionnels de machines synchrones. Tout naturellement, les distributeurs d'électricités ont regardé l'arrivée de ces ECGs avec une certaine hésitation, en raison de leurs caractéristiques de fonctionnement peu familières et en raison de leur utilisation habituelle dans des installations de faibles puissances. Le niveau d'inquiétude a augmenté avec la taille rapidement croissante des projets proposés relativement à la quantité d'énergie injectée dans le réseau et/ou aux niveaux minimum de charge. Il est naturellement parfaitement faisable de développer la puissance dans de nouveaux ou existants circuits de distribution, et d'exporter même la puissance dans le système de transmission, mais de cette manière nous entrons en conflit avec certaines règles traditionnelles qui ont été faites lors de la conception de la protection et de régulation de tension pour ces circuits de distribution. Cela vaut particulièrement dans le cas des niveaux plus élevés de pénétration pour la production d'électricité photovoltaïque.

## Principaux freins ou blocages du raccordement de grands projets de PV

Avec l'introduction des tarifs d'injection attractifs et des crédits d'impôt favorables pour les énergies renouvelables, associés à la baisse rapide des coûts des modules PV, il y a eu une précipitation sans précédent pour installer de grands projets PV dans beaucoup de régions du monde. En conséquence, les gestionnaires d'électricité ont été inondés avec des demandes de connexion au réseau. Dans beaucoup de cas le réseau de distribution n'était pas préparé pour traiter ceci, particulièrement dans le cas des projets à grande échelle (5 MW à >10 MW) demandant l'interconnexion au niveau de la distribution en tension. Globalement, la norme actuelle d'IEEE 1547 n'apporte pas les réponses requises pour rassurer les exploitants de réseaux, parce que ces scénarios de haute pénétration n'ont simplement pas été prévus quand la norme a été élaborée. Les principaux problèmes et les conditions affectant actuellement l'interconnexion des systèmes PV incluent :

Capacité de court-circuit, limitation du couple Puissance-distance, retour sur le système de PV, dispositions douanières spéciales pour le déploiement de puissance réactive, conditions adaptées aux besoins du client, qualité de la tension fournie, mise à la terre du système PV. Une description détaillée de tous ces aspects est au-delà de la portée de ce chapitre.

En résumé, les progrès dans la technologie des inverseurs ont pu faciliter les niveaux élevés de pénétration de PV de grande taille et peuvent également mener à de substantielles économies pour les exploitants de réseaux en réduisant les pertes en ligne. Les inverseurs avancés peuvent nettement réduire les opérations de commutation de régulateur, prolongeant de ce fait la vie de l'équipement, réduire le coût de maintenance, reporter le coût de remplacement de condensateurs etc.

## Bibliographie

- [1] International Energy Agency (IEA) report
- [2] International Energy Agency (IEA) report: Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy, 2014 edition (International Energy Agency report 2014)
- [3] Graham-Rowe, Duncan. "Solar cells get flexible." *Nature Photonics* 1.8 (2007): 433-435.

