

Les enjeux du développement des technologies photovoltaïques et la création de l'Institut National de l'Énergie Solaire

Bien que ne contribuant encore que de manière très marginale à la production d'énergie dans le monde, l'énergie solaire est en train de devenir un enjeu sociétal, industriel et technologique majeur. L'inéluctable raréfaction des combustibles fossiles et le réchauffement climatique poussent très fortement au développement des énergies renouvelables, en particulier de celles que l'on peut retirer de la conversion directe du rayonnement solaire en électricité (photovoltaïque – PV) ou en chaleur (solaire thermique). La ressource est immense (voir la figure 1) et les seuls freins sont le coût de l'investissement nécessaire (mais nous verrons que ce coût est appelé à diminuer régulièrement) et la nature intermittente de la production.

par **Jean-Pierre JOLY***

Mais pour arriver à amorcer cette baisse de coût, il est nécessaire de créer un marché, et donc une industrie : c'est la raison pour laquelle des pays (tout d'abord le Japon, puis l'Allemagne et aujourd'hui un grand nombre d'autres pays) ont mis en place un cadre réglementaire qui favorise le développe-

ment de ce marché et qui est basé, le plus souvent, sur l'imposition de tarifs incitatifs de rachat de l'énergie produite.

* Directeur général de l'INES.

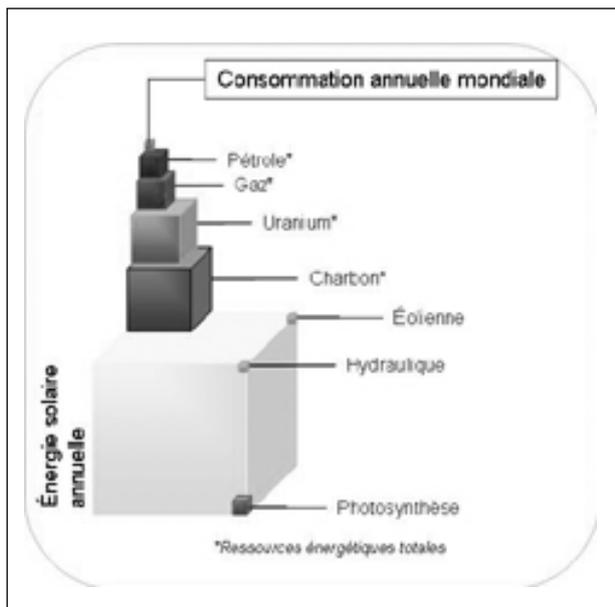


Figure 1 : Comparaison des ressources énergétiques.

Le résultat de ces politiques est un taux de progression impressionnant des capacités installées : les taux de croissance annuelle, très réguliers, sont de l'ordre de 40 % (voir la figure 2). Rares sont les industries qui peuvent afficher de tels taux, surtout avec une telle régularité ! Il est intéressant de remarquer, dans les chiffres de la figure 2, l'importance du marché européen, sous l'impulsion de l'Allemagne et de l'Espagne.

Il faut bien reconnaître que la France est restée à la traîne de cette dynamique jusqu'en 2006. Il est vrai que la partie continentale du pays est dans une situation particulière puisque l'électricité y est produite essentiel-

lement à partir du nucléaire, donc avec très peu d'émission de CO₂ et à relativement bas coût. De plus, les autorités et l'opérateur historique (EDF) ne voyaient pas d'un très bon œil l'arrivée d'un grand nombre de petits producteurs injectant de l'énergie de façon peu contrôlée dans le réseau électrique public, car ils redoutaient que cela n'en affecte la stabilité. En France, avant 2006, la seule application du photovoltaïque officiellement défendue était donc l'équipement des îles (en particulier des DOM-TOM).

La tendance s'est inversée vers 2006. La raison en est double : la France s'est engagée, dans le cadre européen, à porter sa part d'électricité issue d'énergies renouvelables à 23 % et les autorités ont mesuré (en examinant le modèle allemand) combien ce nouveau secteur représentait un important gisement de richesses et d'emplois.

Le Gouvernement de M. Dominique de Villepin a donc instauré un tarif de rachat parmi les plus élevés du monde et, depuis, le Gouvernement français a pris des engagements renouvelés en faveur du développement de cette filière, comme en témoignent les déclarations du Président Nicolas Sarkozy, lors de sa visite à l'INES en Juin de cette année (2009).

Comme dans beaucoup de secteurs, le développement de l'industrie qui nous occupe, présuppose la conjonction de trois éléments :

- l'existence d'un marché dynamique ;
- un flux d'innovations constant, permettant aux entreprises de maintenir une forte compétitivité, dans un marché mondial ;
- enfin, des investissements industriels importants, afin de se doter d'outils de production performants et de haute productivité.

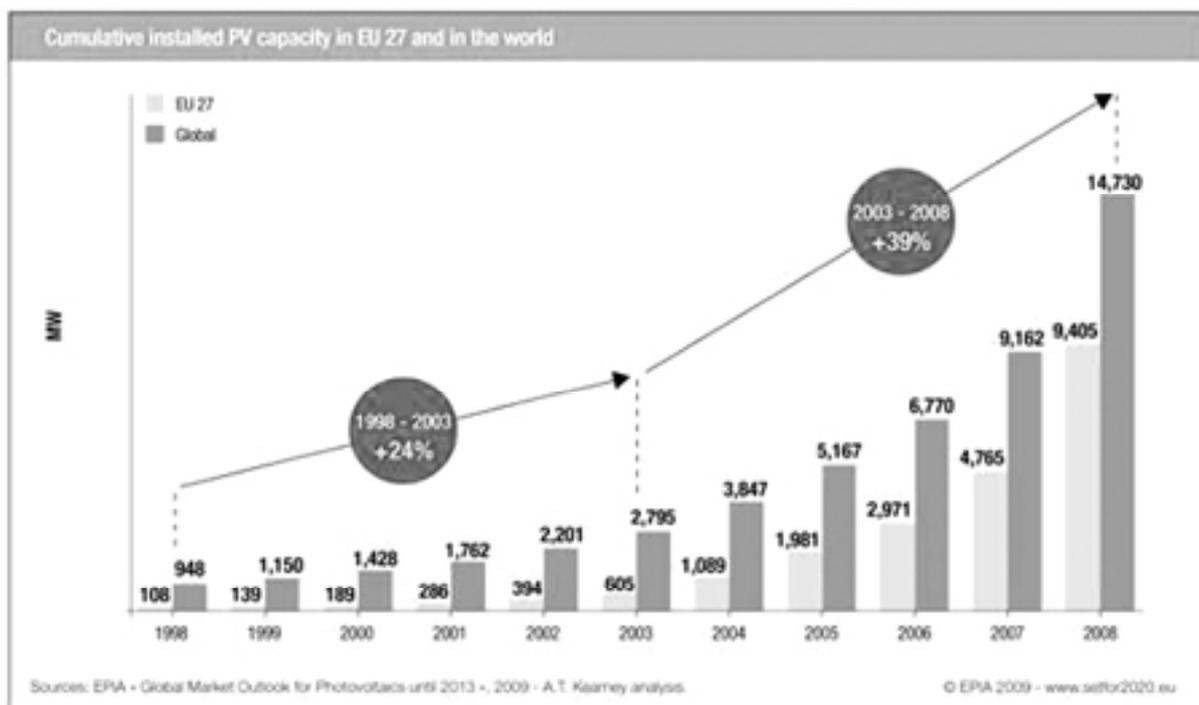


Figure 2 : Progression du marché Photovoltaïque au cours des dernières années.

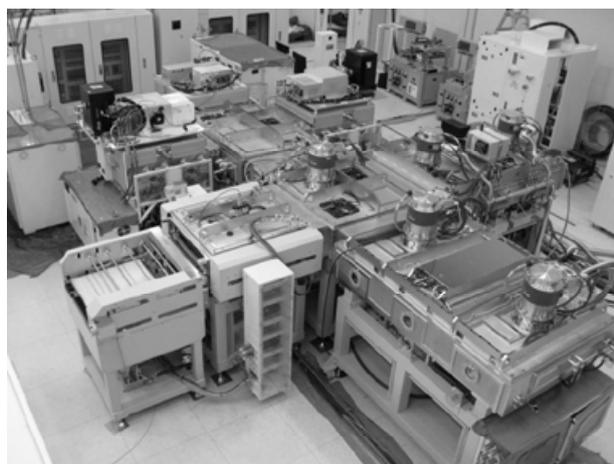
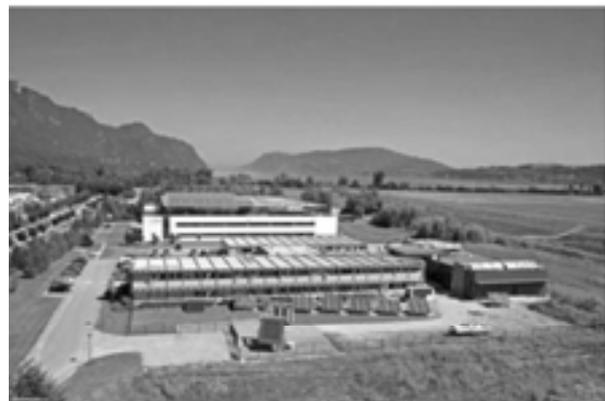


Figure 3 : Vue générale du site de l'INES et des installations du laboratoire dédié aux cellules silicium cristallin (plateforme RESTAURE).

Le premier élément est désormais assuré, grâce à la mise en place du système de rachat d'électricité. La création d'instituts tels que l'INES vise à fournir le deuxième. Des signes encourageants existent, en ce qui concerne le troisième et dernier élément, même si beaucoup reste à faire en matière d'investissement industriel.

• le fort investissement de grands laboratoires de recherche, au premier rang desquels le CEA, mais aussi l'Université de Savoie et le CNRS.

Tous ces partenaires publics ont donc décidé de se fédérer pour créer l'Institut.

L'INES, UNE VOLONTÉ PARTAGÉE

Avant 2006, en raison du contexte décrit plus haut, le constat a été fait que la recherche française était à la fois relativement faible et trop dispersée. En réalité, les laboratoires français avaient joué historiquement un rôle important dans le développement de concepts et de technologies photovoltaïques, mais, en l'absence de relais industriel, les forces s'étaient étiolées. C'est le renouveau d'intérêt pour le photovoltaïque qui a motivé la mise en place d'acteurs de recherche possédant une taille critique, à l'instar des grands instituts mondiaux du secteur, comme le *Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme* (ISE) de Freiburg (en Allemagne) ou le *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) de Denver (aux Etats-Unis).

L'idée de créer en France un Institut National de l'Énergie Solaire est donc née tout naturellement. L'initiative en a été prise, en 1998, par le département de la Savoie, avec un fort soutien de la Région Rhône-Alpes et de l'Ademe, qui a joué un rôle de catalyseur, permettant à ce projet de devenir une réalité, au Bourget-du-Lac.

En 2005, la mise en route effective de l'INES a résulté de la convergence de quatre facteurs déterminants :

- l'appui financier des collectivités locales (Département de la Savoie et Région Rhône-Alpes) ;
- une sensibilité particulière de la population, du tissu associatif et des élus de ce département à la problématique de l'énergie solaire ;
- la présence historique d'industriels pionniers du secteur (Clipsol, Photowatt...) ;

L'INES : DES ÉQUIPES ET DES MOYENS DE TOUT PREMIER PLAN

Trois ans après sa création, l'INES est d'ores et déjà devenu un organisme d'une importance et d'une notoriété internationales. Alors qu'il ne comptait que 10 personnes à la fin 2005, son effectif est aujourd'hui de 170. Quatre nouveaux bâtiments ont été rajoutés au bâtiment initial, constituant une plateforme de 10 000 m² (voir la figure 3). Quinze millions d'euros ont été investis dans la construction des bâtiments et 25 millions dans les équipements, la Région Rhône-Alpes et le Département de la Savoie ayant contribué chacun à hauteur de 15 millions.

Le CEA a fait le plus gros effort en déplaçant ses laboratoires de Saclay (Photovoltaïque Organique), de Cadarache (Systèmes photovoltaïques et Systèmes de stockage) et de Grenoble (Cellules Silicium et plateforme nationale RESTAURE). Il a aussi embauché environ 70 chercheurs (débutants ou confirmés) pour compléter les équipes existantes. L'Université de Savoie, en association avec le CNRS, a orienté deux de ses laboratoires – le LOCIE (Laboratoire d'Optimisation de la Conception et d'Ingénierie de l'Environnement) et le LMOPS (Laboratoire des Matériaux Optiques, de la Photonique et des Systèmes) – vers les thématiques de l'énergie solaire.

Dès le départ, la stratégie a consisté à couvrir l'ensemble de la chaîne de la valeur du secteur – du matériau aux applications finales – sans oublier le solaire thermique, qui nécessite, lui aussi, des efforts en termes d'ingénierie et de connaissance. Le captage de l'énergie solaire étant appelé à s'intégrer essentiellement dans les bâti-

ments, contribuant ainsi à réduire fortement leur consommation d'énergie encore beaucoup trop importante, l'INES a décidé de travailler également dans le domaine de l'intégration du solaire aux bâtiments et dans celui de la conception et de la simulation des bâtiments du futur.

LA STRATÉGIE DE RECHERCHE DE L'INES EN TERMES DE DÉVELOPPEMENT DES CELLULES ET DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES

L'insertion dans le contexte général

Les recherches menées dans le domaine des modules photovoltaïques ont pour unique objectif de réduire les coûts d'investissement et donc, *in fine* le prix du kWh produit.

Cette diminution peut être obtenue de trois façons complémentaires :

- en abaissant le coût des étapes de fabrication, sans sacrifier le rendement de conversion ;
- en augmentant le rendement de conversion sans pénaliser le coût de production, ce qui, en réalité, a un double effet : cela diminue la part du module dans le coût de la puissance installée, mais aussi la part des coûts additionnels (connexions, frais d'installation et de fixation), qui sont souvent proportionnels à la surface des modules ;
- en augmentant le facteur de performance des cellules photovoltaïques (le facteur de performance d'une cellule PV est le ratio Quantité d'électricité produite / Puissance nominale installée).

Sur le marché, deux familles de technologies sont aujourd'hui en compétition :

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

Dans la fabrication des couches minces, trois matériaux sont utilisés : le tellure de cadmium (CdTe), les chalcopyrites de type di-séléniure de cuivre-indium (CuInSe_2), avec substitution (totale ou partielle) de l'indium (In) par le gallium (Ga) et du sélénium (Se) par du soufre (S) et, enfin, le silicium (Si), sous la forme, en tout premier lieu, de silicium amorphe ou d'associations silicium amorphe/silicium dit microcristallin.

Les laboratoires de recherche travaillent aussi sur de nouveaux concepts de cellules dites de troisième génération, dans lesquelles on peut classer les cellules à base de matériaux organiques et celles à base de nanostructures.

Dans la phase initiale, l'INES a décidé de mettre la priorité sur les cellules à base de silicium cristallin.

Même si les cellules à couches minces offrent des avantages intrinsèques intéressants (facilité de mise en œuvre, faibles quantités de matière active, moins d'éta-

pes de fabrication concentrées dans une seule unité de production), le silicium cristallin gardera durablement une large part de marché pour les raisons suivantes :

- il offre une garantie de fiabilité découlant d'une technologie permettant de produire des cellules exemptes de toute instabilité et bénéficiant de nombreuses années de recul ;
- il n'encourt aucun risque de pénurie de ressources minérales, comme dans le cas du CdTe (faible disponibilité du tellure, une terre rare) ou du cuivre-indium-gallium-sélénium dit « CIGS » (faible disponibilité de l'indium) (voir la figure 4, qui met en évidence les capacités de production d'électricité photovoltaïque envisageables, en fonction des quantités de tellure (Te) et d'indium (In) accessibles (1)) ;
- les modules sont exempts de métaux toxiques ;
- les rendements de conversion des cellules au silicium cristallin sont largement supérieurs à ceux des cellules à couches minces, ce qui induit un coût du kW installé plus compétitif, en raison également de coûts additionnels d'installation plus faibles, en particulier pour les applications dans le bâtiment ;
- son fort potentiel de réduction des coûts, grâce à l'utilisation de silicium purifié, moins cher que le silicium cristallin de qualité électronique (voir plus loin les développements réalisés sur ce sujet à l'INES), à la diminution des quantités de silicium nécessaires par Watt (réduction des épaisseurs des tranches, suppression du sciage) et à l'amélioration des rendements de conversion (de 15 % à 20 %).

En ce qui concerne les choix faits par l'INES, il convient de rajouter, à ces raisons fondamentales, des considérations liées à la conjoncture locale, avec :

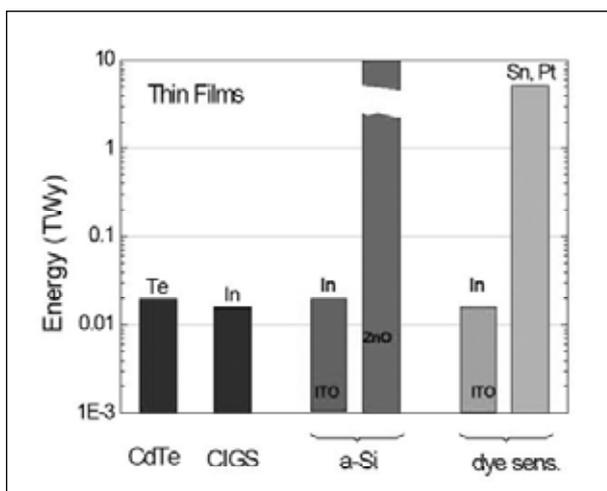


Figure 4 : Limitation de la quantité d'énergie solaire qui serait produite par les couches minces en raison d'un accès limité aux réserves de matières premières nécessaires à leur production.

(1) Feltrin and Freundlich, *Renewable energy*, 2008, vol. 33, n° 2 (178 p.), E-MRS 2006 Symposium M: Materials, Devices and Prospects for Sustainable Energy, Nice, France (29/05/2006).

- une légitimité, pour les instituts français, à soutenir la seule unité de production industrielle de masse implantée en France (en région Rhône-Alpes), Photowatt, qui est basée sur le silicium cristallin ;
- l'existence en France d'autres acteurs de recherche, comme l'Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque (IRDEP), qui étaient déjà positionnés sur le créneau des couches minces avant la création de l'INES.

En parallèle, l'INES a toutefois décidé de maintenir ses efforts dans le domaine du développement des technologies PV organiques, basées sur le concept des hétérojonctions de type polymères conjugués (PH3T associé au PCBM ([6,6]-phényl-C61-butyrate de méthyle), un semi-conducteur organique de type fullerène). Ce sont des technologies porteuses d'avenir, dans lesquelles l'INES possède une compétence forte, même si de puissants verrous doivent encore être levés avant de pouvoir envisager leur déploiement à grande échelle. L'INES a focalisé ses efforts sur deux points essentiels :

- la mise en œuvre de procédés de fabrication de cellules optimisés, ce qui a permis d'améliorer de manière constante les rendements de conversion ;
- le développement et la caractérisation de matériaux barrières aux oxydants de l'atmosphère, point essentiel pour améliorer la durabilité de ces cellules.

Les rendements de conversion se sont améliorés constamment ; ils sont désormais supérieurs à 5 %. Par ailleurs, en matière de durabilité des cellules, l'INES a développé des méthodes de mesure de la perméation de l'oxygène de l'air dans les couches-barrières, avec des sensibilités inégalées – une méthode qui fait désormais référence, y compris pour d'autres applications.

LES DÉVELOPPEMENTS ET LES RÉSULTATS OBTENUS PAR L'INES DANS LE DOMAINE DU SILICIUM CRISTALLIN

Les recherches menées par l'INES sur le silicium cristallin se sont focalisées sur deux axes essentiels :

- le changement de mode de purification du silicium afin de réduire le coût financier et énergétique de cette opération, tout en minimisant l'impact des impuretés résiduelles sur le rendement des cellules ;
- la recherche d'architectures de cellules innovantes visant à obtenir des rendements proches des 20 %, tout en n'entraînant pas de hausse excessive du coût de fabrication.

Un nouveau procédé original de purification du silicium a été développé par l'INES à partir de travaux menés depuis plusieurs années par le CNRS (2). Ce procédé est entièrement basé sur des procédés métallurgiques et il ne passe donc pas par des intermédiaires gazeux de type chlorosilane, utilisés dans le mode usuel de purification du silicium pour l'obtention de la qua-

lité « électronique » ; il associe des phases de fusion/cristallisation, avec rejet de la fraction fondue résiduelle, où se concentrent les impuretés (processus de ségrégation utilisant à profit les faibles coefficients de partage de nombreuses impuretés) et une phase de traitement par torche plasma, qui vise à éliminer des impuretés à coefficient de partage proche de l'unité, telles que le bore. Le projet associé à ce développement, qui réunit l'INES (CEA et CNRS) et les industriels Apollon Solar et FerroPem, a pour nom Photosil.

Les équipements prototypes de taille industrielle et les procédés associés ont été mis au point avec succès (voir la figure 5). Des cellules de grande taille d'un rendement supérieur à 15,5 % ont été obtenues en utilisant ce type de silicium (Photosil), ce qui constitue un excellent résultat, se situant à la pointe de ce qui a pu être obtenu jusqu'ici en matière de silicium purifié autrement que par le procédé dit « électronique » (3). Ce résultat n'aurait pas pu être obtenu sans une compréhension approfondie des effets des impuretés résiduelles contenues dans le silicium, un domaine dans lequel l'INES s'est aussi spécialisé.

Plusieurs architectures de cellules innovantes ont été développées à (et par) l'INES (cellules à émetteur sélectif, cellules sur matériau de type n), mais un effort intense a été concentré sur les cellules dites à hétérojonctions (dont le schéma de fonctionnement est donné à la figure 6a). L'utilisation de fines couches de silicium amorphe hydrogéné (respectivement de type p, pour l'émetteur, et de type n, pour la prise de contact sur la base) permet d'obtenir des propriétés remarquables de la cellule, bien supérieures à celles d'une cellule réalisée par diffusion d'impuretés dopantes en surface. Les cellules ainsi conçues se caractérisent par :

- une passivation totale des centres recombinants en surface, due à la présence d'hydrogène, ce qui permet

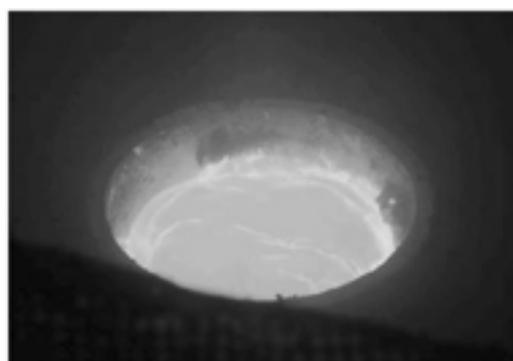


Figure 5 : Visualisation du silicium fondu et de son brassage électromagnétique dans l'équipement prototype de purification par torche Plasma du projet Photosil, installé à l'INES.

(2) R. Einhaus, Y. Caratini, D. Bernou, F. Servant, R. Monna, C. Trassy, J. Kraiem, J. Degoulange, S. Martinuzzi, I. Périchaud, Proceedings of the 21st EPVSEC, Dresde, Allemagne (2006).

(3) Résultats non encore publiés.

d'augmenter significativement leur rendement de conversion ;

- une moindre sensibilité de la cellule à la température de fonctionnement ;
- une bien meilleure compatibilité avec l'utilisation de tranches ultra-minces de silicium.

Sanyo commercialise d'ores et déjà des cellules d'une architecture similaire ; il a déjà obtenu des rendements de conversion de 23 %, avec des cellules de grande taille (4). Une des difficultés majeures de ce procédé est la maîtrise de l'interface entre le silicium amorphe et le silicium cristallin. Les progrès obtenus à l'INES dans ce domaine sont très récents, avec l'arrivée des machines Clef, en début d'année 2009. D'ores et déjà, l'on peut constater les progrès accomplis, avec des rendements supérieur à 18 % et une bonne qualité de l'interface (ce que montre la figure 6 b). Bien qu'encore fortement en retrait par rapport à ceux de Sanyo (qui possède une expérience de plus de dix ans dans le domaine), ces résultats sont les meilleurs à avoir jamais été obtenus pour des cellules de grande taille, par comparaison à d'autres acteurs.

PERFORMANCE ET FIABILITÉ DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES : UNE NOUVELLE MÉTHODOLOGIE, APPORTÉE PAR L'INES

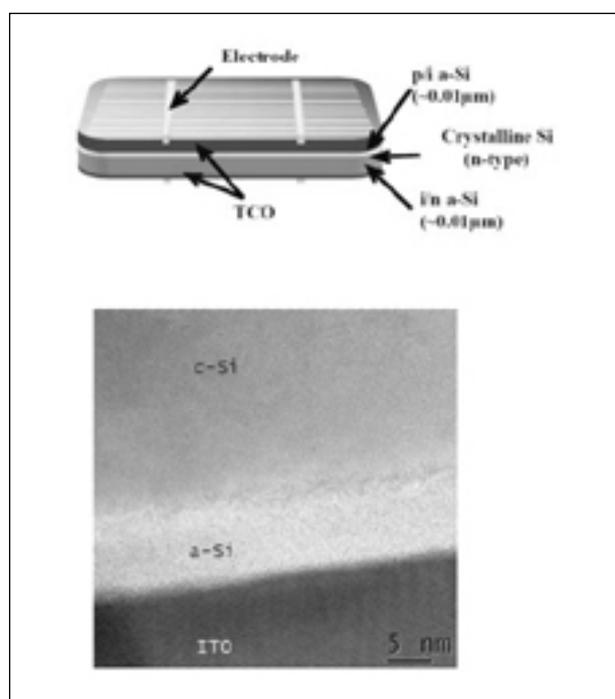


Figure 6 :
a : Schéma de principe d'une cellule hétérojonction silicium amorphe (a-Si)/silicium cristallin (Crystalline Si) ;
b : Vue de la structure au microscope électronique en transmission.

La puissance délivrée par un module photovoltaïque n'est certifiée que pour des conditions d'opération nominales (température, irradiation, angle d'incidence). Dans la réalité, le module fonctionne souvent dans des conditions différentes, et il n'est donc pas possible de déduire, *a priori*, quelle sera la quantité d'énergie qui sera délivrée par un module sur un cycle annuel, par la seule connaissance de sa puissance normalisée et de l'irradiation moyenne d'un site donné.

Des différences pouvant aller jusqu'à 20 %, ont été constatées entre des modules de même puissance, mais de technologies différentes, testés sur un même site. Ce phénomène est particulièrement notable dans les climats tempérés comme celui de la France, sous lesquels les modules fonctionnent souvent avec un ensoleillement plus ou moins diffus (et donc, avec une faible irradiation).

Pour pallier cette difficulté, l'INES a développé une méthodologie originale de mesure en environnement réel, basée sur la mesure en continu des courbes I (V), en parallèle à celle des paramètres environnementaux (irradiation calibrée, température). Une statistique complète est ainsi obtenue pour chaque module, l'INES disposant de deux centrales d'acquisition, l'une en Savoie et l'autre en Provence, deux régions aux climats différents. On peut, en particulier, tracer des courbes de variation du facteur de performance des modules en fonction de l'irradiation (voir la figure 7) et constater les différences de comportement entre ceux-ci à faible irradiation.

A partir de ces données, l'INES a développé un modèle prédictif, MOTHER PV, pour prédire l'énergie produite par un type de module dont on aura précédemment mesuré les performances selon le mode décrit plus haut et ce, pour un lieu et un mode d'opération donnés (5). En matière d'analyses comparées, ce modèle est beaucoup plus fiable que les modèles proposés précédemment.

L'INES a aussi proposé d'utiliser les données ainsi générées pour procéder à une analyse fine des phénomènes de dégradation des modules au fil du temps (6). Cette méthode repose sur le modèle de cellules considérées comme des circuits équivalents et sur l'extraction des paramètres du circuit équivalent à partir de mesures sous illumination variable (en anglais : VIM, pour *Variable Illumination Measurement*). On peut ainsi suivre plus finement la manière dont les différents éléments constitutifs de la cellule se comportent dans le temps, mieux interpréter les mécanismes de dégrada-

(4) Shigeharu Taira, Yukihiro Yoshimine, Toshiaki Baba, Mikio Taguchi, Hiroshi Kanno, Toshihiro Kinoshita, Hitoshi Sakata, Eiji Maruyama and Makoto Tanaka, 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 3-7 Septembre 2007, Milan, Italie.

(5) *Description of MOTHERPV, the new method developed at INES / CEA for the assessment of the energy production of photovoltaic modules*, par Antoine Guérin de Montgareuil, EU PVSEC, Milan, 2007.

(6) *Outdoor evaluation of the energy production of different module technologies*, par Jens Merten, Lionel Sicot, Yves Delesse et Antoine Guérin de Montgareuil, EU PVSEC, Valence, Espagne, 2008.

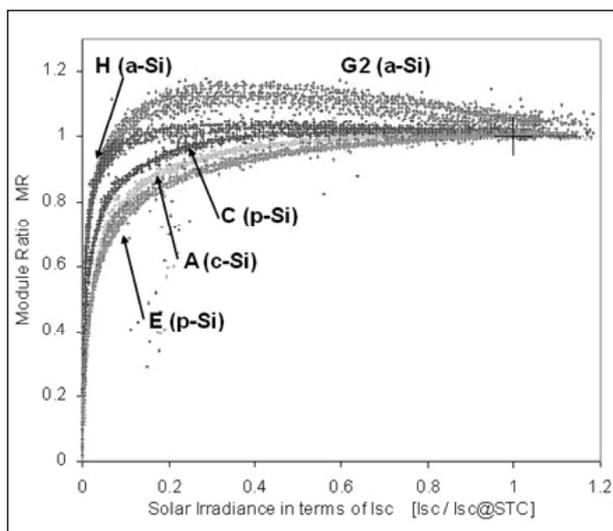


Figure 7 : Mesure du facteur de performance (Puissance mesurée/Puissance attendue) en fonction de l'irradiation, pour différents modules : silicium amorphe (H et G2), silicium monocristallin (A) et silicium poly-cristallin (C et E).

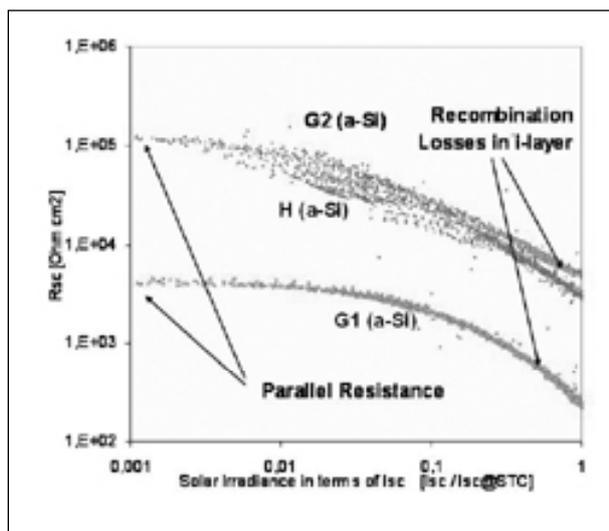


Figure 8 : Extraction des résistances parallèles et des pertes par recombinaison dans la zone de charge d'espace pour deux technologies Silicium amorphe, à partir de l'analyse des réponses des modules à différentes irradiations.

tion et mieux prédire la durée de vie des produits. Un exemple des extractions de paramètres, pour une cellule au silicium amorphe, est donné à la figure 8.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'INES a su prouver, en peu de temps, qu'il était possible de mettre en place, dans un pays comme la France, une infrastructure de recherche compétitive à l'échelle internationale. Cette infrastructure sert d'appui aux initiatives industrielles qui se développent actuellement et qui permettront à notre pays de prendre toute sa part dans l'essor de cette industrie majeure du futur.

Des choix nécessaires ont été faits en termes de stratégie de recherche, avec une orientation initiale majoritaire vers les technologies silicium moins tributaires de l'approvisionnement en ressources minières et mieux adaptées à l'intégration au bâti.

D'ores et déjà, des résultats probants ont été obtenus dans le domaine de la réduction du coût et dans celui de l'amélioration des performances des modules, avec, en perspective, des produits présentant un coût d'un euro le watt-crête (1 €/Wc) et affichant un rendement de conversion de l'ordre de 20 %.

L'INES se préoccupe aussi de mettre en place des outils et des méthodes permettant d'apporter aux acteurs

économiques et aux clients une garantie de performance et de fiabilité. Rien ne serait pire pour l'avenir de l'énergie solaire qu'une rupture du contrat de confiance. L'INES affiche, dans ce domaine de l'analyse de performance, des résultats et une ambition de tout premier plan. Le Gouvernement français a confirmé cette légitimité en demandant à notre Institut de mettre en place une plateforme nationale d'étude de performance, dénommée Promosol.

Bien sûr, beaucoup reste à faire. Les enjeux sont énormes et la compétition est rude. Il faut donc continuer à intensifier les efforts de recherche et atteindre rapidement, comme l'a demandé le Président Nicolas Sarkozy, un effectif de l'ordre de cinq cents personnes pour l'Institut.

Cela devra s'accompagner d'une structuration de l'industrie du photovoltaïque tout au long de la filière, depuis les matériaux de base jusqu'à l'introduction dans le réseau de l'énergie produite et la gestion de la nature intermittente de cette énergie.

Pour cela, nous devons mobiliser les acteurs publics, à l'échelle de l'Etat et des collectivités locales, ainsi que des acteurs industriels puissants. C'est du domaine du possible : le succès de la mise en place de l'INES est en lui-même un message d'encouragement.