

- [Sophia Publications](#)
- [Historia](#)
- [L'Histoire](#)
- [Le Magazine Littéraire](#)
- [La Recherche](#)
- [Sophia Boutique](#)
- [connexion](#)
- [inscription](#)

La Recherche

- [Actualités](#)
- [Savoirs](#)
- [Idées](#)
- [Ressources](#)
- [Événements](#)
- [Espace Abonné](#)
- [Boutique](#)
- [Dossiers](#)
- [Dossiers](#)
- [Par année](#)
- [Contact](#)
- [Newsletters](#)
- [Édition Numérique](#)

[dossier](#)

1 - Photovoltaïque : le silicium s'impose

[dossier](#) - par Franck Daninos dans [mensuel n°436](#) daté décembre 2009 à la page 40 (2322 mots) |
Gratuit

Des panneaux solaires de plus en plus performants et de moins en moins chers : l'énergie solaire a de beaux jours devant elle grâce aux nouvelles technologies du silicium.

O lmedilla de Alarcón, communauté autonome de Castille-La Manche, en plein coeur de l'Espagne. Des panneaux solaires s'étendent à perte de vue : plus de 160 000, au total, couvrant une superficie de 130 hectares. Mise en service en septembre 2008, la centrale photovoltaïque d'Olmedilla est la plus importante au monde. Elle délivre une puissance de 60 millions de watts-crête * et peut alimenter 40 000 foyers en électricité. Mais elle sera bientôt surpassée par une autre centrale dont la construction débutera en 2010, dans le nord de la Californie. Occupant une surface de 285 hectares, elle devrait délivrer une puissance de 550 000 millions de watts-crête.

On le voit. Dans le domaine de l'énergie photovoltaïque, les records sont éphémères, pour la puissance des centrales comme pour le nombre de panneaux installés sur les toits des entreprises, des bâtiments publics et des particuliers. Depuis 2005, le marché du photovoltaïque croît de façon exponentielle : de 40 % à 50 % chaque année. Et la puissance photovoltaïque installée dans le monde a plus que doublé

en 2008 par rapport à l'année précédente, passant de 2,65 milliards à 5,8 milliards de watts-crête.

Évidemment, au regard des autres sources d'électricité, le recours à l'énergie solaire reste marginal moins d'un dixième de pourcent, notamment par rapports aux énergies fossiles et nucléaires. Mais « *elle connaît un essor fulgurant*, insiste Dick Heslinga, qui dirige le laboratoire des composants solaires à l'Institut national de l'énergie solaire. *Tous les acteurs du domaine s'attendaient à ce que le boom du photovoltaïque se produise un jour ou l'autre. En effet, les résultats de recherche et le savoir-faire dans la fabrication des panneaux s'étaient accumulés depuis des décennies* . » Cette dynamique se libère enfin. Mais pourquoi aujourd'hui et à un tel point ?

Rayonnement électromagnétique.

Aux sources du solaire, un phénomène identifié en 1839 par Antoine Becquerel, un demi-siècle avant que son petit-fils, Henri, ne découvrit la radioactivité. Expérimentant de nouvelles piles électrochimiques, Antoine Becquerel remarqua que la quantité d'électricité libérée variait en fonction de la luminosité ambiante. Baptisé « effet photovoltaïque » ou encore « effet photoélectrique », ce phénomène correspond à l'émission d'électrons dans des matériaux exposés à un rayonnement électromagnétique tel que la lumière. Ces matériaux sont généralement des métaux ou des semi-conducteurs. L'effet photovoltaïque a été expliqué par l'Allemand Heinrich Rudolf Hertz, et surtout par Albert Einstein, ce qui valut à ce dernier le prix Nobel de physique en 1921.

Einstein démontra que l'émission d'électrons dépendait du caractère ondulatoire, mais aussi corpusculaire de la lumière : autrement dit des « grains » de lumière, appelés photons, dont l'énergie est proportionnelle à leur fréquence d'oscillation. Plus cette fréquence est élevée, plus grande est l'énergie des photons. Pour que des électrons soient libérés *via* l'effet photovoltaïque, l'énergie des photons doit être égale ou légèrement supérieure à une valeur seuil, variable selon la composition chimique du métal ou des semi-conducteurs. Sans quoi, les photons ne feront que les traverser ou être réfléchis. Seule une partie des photons constituant la lumière solaire conduit ainsi à l'émission d'électrons.

Cette émission entraîne la formation de lacunes électroniques - des « trous », dans le langage des physiciens. Les électrons et les trous possèdent la même énergie, mais une charge de signe opposé : négative pour les électrons, positive pour les trous. Ces paires d'électrons et de trous ont une existence généralement éphémère : elles reviennent à leur état fondamental en libérant de l'énergie sous forme de chaleur.

Mais cette même énergie peut aussi être récupérée sous forme d'électricité. Tel est le principe sur lequel reposent les cellules photovoltaïques en silicium, dont les premières réalisations datent de 1954. Elles ont été fabriquées par des chercheurs des Bell Labs, dans le New Jersey. De façon accidentelle, ces physiciens avaient remarqué qu'un échantillon de silicium contenant un certain type d'impuretés chimiques était particulièrement sensible à l'effet photovoltaïque.

Le silicium ? C'est l'un des éléments chimiques les plus répandus sur terre. Il fait partie de la famille des semi-conducteurs. Cela signifie qu'on peut moduler sa conductivité entre un état isolant et un état conducteur. Le passage d'un état à un autre est caractérisé par un seuil d'énergie, appelé « gap ». Il se produit, notamment, lorsque des photons possédant une énergie égale ou supérieure au gap irradient le semi-conducteur. Des électrons sont alors excités par effet photovoltaïque.

Or, le gap du silicium est inférieur à l'énergie d'une grande part des photons du spectre solaire. Cela en fait un candidat parfait pour fabriquer des cellules photovoltaïques, d'autant qu'il est abondant.

Dopage chimique

Mieux encore, l'effet photovoltaïque peut être amplifié en ajoutant au silicium des impuretés chimiques. En l'espèce, les chercheurs des Bell Labs avaient utilisé des atomes de phosphore et de

bore. Le phosphore augmente le nombre d'électrons libérés dans le silicium. Quant à la présence de bore, elle a pour conséquence d'augmenter le nombre de trous. Les cellules des Bell Labs étaient ainsi composées de deux couches de silicium ; la première contenait du bore, et la seconde du phosphore. Lorsqu'elles étaient exposées à la lumière, des électrons et des trous étaient libérés en nombre égal : les trous migraient vers la seconde couche, tandis que les électrons se déplaçaient en sens inverse. Un courant électrique était ainsi généré et collecté au moyen d'une grille conductrice [fig. 1] .

Polycristaux

Un résultat fondateur pour le photovoltaïque, mais à quel coût ! Les cellules des Bells Labs présentaient un rendement de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique d'environ 6 %. Le prix du wattheure * qu'elles produisaient était excessivement cher, supérieur à 1 700 dollars de l'époque. Mais *« ce prix n'a jamais cessé de diminuer, rappelle Jean-François Guillemoles, de l'Institut de recherche et développement de l'énergie photovoltaïque, en raison, notamment, d'une hausse graduelle des rendements. En théorie, le rendement maximal d'une cellule en silicium s'élève à 30%. Pour s'en approcher, les chercheurs ont joué sur de nombreux paramètres : la pureté cristalline, les impuretés chimiques, les contacts électriques, la résistivité, ou encore la quantité de photons absorbés via des revêtements antireflets. »*

Ainsi, en 1958, le rendement des cellules passait à 9 %. Cette même année, aux États-Unis, était lancé le premier satellite Vanguard I équipé de cellules photovoltaïques, qui servaient à alimenter des émetteurs radioélectriques. Deux ans plus tard, le rendement des cellules atteignait 14 %. Les premières applications terrestres ont ainsi pu voir le jour à partir des années 1970 : pour des balises marines, tout d'abord, puis pour des montres, des calculatrices de poche, des voitures et même des avions, avant d'être utilisé pour fabriquer des centrales photovoltaïques et de couvrir les toits des particuliers.

Dans les années 1980, nouvelle avancée. Un nouveau type de cellules est commercialisé : elles sont composées non plus de monocristaux de silicium, mais de silicium polycristallin. Celui-ci est formé par la juxtaposition de plusieurs cristaux. Son rendement de conversion est intrinsèquement moins élevé que celui du silicium polycristallin. Mais son coût de fabrication est moindre. Or *« le prix du wattheure photovoltaïque est lié à la fois au rendement et au coût de fabrication des cellules »* , précise Jean-François Guillemoles. L'utilisation du silicium monocristallin ou polycristallin dépendra ainsi du type d'applications : lorsque celui-ci limite la surface disponible, on utilisera plus volontiers du silicium monocristallin ; et la forme polycristalline si l'on dispose de plus larges étendues.

L'industrialisation plus poussée a fait encore baisser le coût de fabrication des cellules au cours des années 1990. D'importantes structures de production ont remplacé les anciennes, historiques, plus petites. La fabrication en masse entraîne toujours des effets d'échelle : au niveau économique, comme sur le plan du savoir-faire technologique. En 2000, le prix moyen du watt-crête produit par des cellules en silicium était ainsi de 3 dollars. Et le rendement des cellules en silicium monocristallin atteignait alors 16 % en production industrielle.

Préoccupations climatiques

Mais, en dépit de ces baisses significatives, le coût de l'électricité photovoltaïque demeurerait toujours trop élevé pour rivaliser avec les autres sources d'énergie au début des années 2000. Ce n'est pas la technologie, mais bien l'économie et la politique qui ont fait, à ce moment-là, décoller le photovoltaïque. Tout d'abord, la montée en puissance du prix du pétrole. Flambées de prix conjoncturelles et tendance haussière à long terme, puisque cette énergie fossile est une ressource finie. Les préoccupations climatiques, ensuite, qui se sont intensifiées depuis la fin des années 1990. Elles ont rendu problématique la consommation des énergies fossiles productrices de gaz à effet de serre. Elles ont surtout conduit à un intérêt accru pour les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire.

Résultat : ces dernières années, dans nombre de pays industrialisés, d'importants programmes d'aide publique à l'industrie photovoltaïque ont vu le jour. L'Allemagne a été un précurseur. Le Japon, les États-Unis, le Portugal ou l'Espagne ont suivi. La France également, un peu plus tardivement, en raison de l'importance historique de l'énergie nucléaire. L'élément déclencheur a été l'instauration, en juillet 2006, d'un nouveau tarif de rachat du kilowattheure par EDF à ceux qui produisent du photovoltaïque. Il est passé de 30 centimes à 61 centimes d'euro ; alors que le consommateur achète son électricité au prix de 15 centimes. Des avantages fiscaux et des crédits d'impôts ont également été accordés à tous ceux qui ont décidé d'installer des panneaux solaires.

Du coup, le marché du solaire a explosé en France comme dans d'autres pays. À l'été 2009, 24 000 installations en France étaient ainsi raccordées au réseau de distribution d'EDF, selon un rythme de 800 nouveaux raccordements chaque mois ! Le parc photovoltaïque français atteignait alors 135 millions de watts-crête, contre seulement 7 millions en 2005.

Pour autant les aides publiques ne font pas tout. Et de récentes innovations technologiques ont contribué à la prospérité du photovoltaïque. Où en est, à cet égard, la production mondiale ? Elle est toujours dominée, à environ 85 %, par les cellules en silicium. Moitié pour les cellules en silicium monocristallin, dont les rendements atteignent aujourd'hui 20 % ; moitié pour les cellules en silicium polycristallin, qui affichent un rendement de 16 % en production industrielle. Le prix du watt-crête produit *via* ces deux filières est globalement équivalent, autour de trois dollars.

La quinzaine de pourcents restants est occupée par une technologie développée à partir des années 1980 : les cellules en « couches minces » lire « Les promesses des couches minces », p. 42. Elles utilisent des alliages de semi-conducteurs différents du silicium. Leurs rendements sont plus faibles entre 9 % et 14 %. Mais elles nécessitent des quantités de matériaux beaucoup moins importantes. Au final, le prix de l'électricité est moins élevé que pour les cellules en silicium entre 0,8 et 1,2 dollar le watt-crête.

Segmentation du marché

Pour autant, estime Dick Heslinga, et « *contrairement à ce que certains avaient prédit, les couches minces ne supplanteront pas le silicium. Elles gagneront des parts de marché, c'est certain. Mais le silicium conservera toujours une longueur d'avance sur le plan des rendements. Il continuera à dominer le marché et à progresser en termes de volume absolu des ventes* ». On peut ainsi parier sur une segmentation du marché dans les années à venir, comme cela a été le cas lors de l'apparition du silicium polycristallin. Les cellules en silicium seront utilisées pour des espaces restreints, comme les toits des particuliers ; tandis que les couches minces couvriront de grandes surfaces, pour les centrales photovoltaïques, principalement.

Les recherches visant à améliorer les performances des cellules en silicium restent, par ailleurs, extrêmement actives. Avec toujours les deux mêmes objectifs : diminuer les coûts de production et augmenter les rendements. Pour diminuer ces coûts, une nouvelle filière de production de silicium se développe en France grâce à PV Alliance - un consortium créé en 2007, qui regroupe Photowatt l'unique fabricant français de cellules photovoltaïques, le CEA et EDF Énergies nouvelles.

Il s'intéresse à la façon dont le silicium est produit. La majeure partie est issue de procédés conçus spécifiquement pour l'industrie électronique. Ils fournissent du silicium ultrapur et de très bons rendements de conversion. Mais ces procédés sont lourds, longs et onéreux. Et ils conduisent à un niveau de pureté qui n'est pas nécessaire dans le cadre des applications photovoltaïques.

Silicium métallurgique

Le procédé de purification développé par PV Alliance et le CEA conviendrait très bien à ces applications. Il consiste notamment à éliminer les impuretés chimiques présentes dans le minerai de silicium à l'aide d'une torche à plasma *. Qualifié de « métallurgique », le silicium ainsi obtenu

devrait être commercialisé dans quelques années, à un coût trois fois moins important 35 dollars le kilogramme que celui du marché actuel lire « Chute du prix du silicium », p. 41.

En parallèle, plusieurs voies sont explorées pour atteindre de très hauts rendements. L'une d'elles consiste à jouer sur l'architecture et la taille des cellules. Par nanolithographie, certaines parties peuvent être réduites à des tailles infinitésimales. La surface susceptible de convertir l'énergie solaire se trouve ainsi démultipliée. Mais ce changement d'échelle conduit aussi à une modification des propriétés optiques et électroniques du silicium. En raison de phénomènes quantiques, l'énergie du gap varie alors en fonction du diamètre des objets. En accolant plusieurs de ces objets possédant chacun un diamètre différent, il devient possible d'absorber la quasi-totalité du spectre solaire. Des cellules en silicium nanostructuré devraient ainsi présenter des rendements de 22 %, voire de 25 %.

« Ces technologies, et d'autres, seront commercialisables dans six ou sept ans, annonce Éric Laborde, le directeur de PV Alliance. Elles contribueront à faire encore baisser le coût de l'électricité photovoltaïque. Vers 2015, il devrait être inférieur à un demi-dollar le wattheure. » Ce coût serait équivalent à celui de l'électricité produite par les sources d'énergie fossile et nucléaire. Alors, le développement de l'industrie photovoltaïque serait beaucoup moins tributaire de la conjoncture économique et de l'aide des États. Selon les prévisions de l'Association européenne des industriels du photovoltaïque, la part de cette énergie dans la production électrique européenne pourrait ainsi atteindre 12 % en 2020.

Par Franck Daninos

Vous devez [vous identifier](#) ou [créer un compte](#) pour réagir à cet article
Actualités par rubrique

- [Astres](#)
- [Matière](#)
- [Terre](#)
- [Mathématiques](#)
- [Vie](#)
- [Archéologie](#)
- [Cerveau](#)
- [Populations](#)
- [Santé](#)
- [Technologie](#)



Les promesses des énergies renouvelables

Retrouvez l'intégralité du sommaire de cette parution papier [...]

Encadres

- [NOTES](#)
- [L'essentiel](#)
- [Chute du prix du silicium](#)
- [Les promesses des couches minces](#)

Sur le même thème

- [Une norme qui s'impose petit à petit](#)
- [« Face à une demande croissante, l'exploitation de nouveaux gisements s'impose »](#)
- [Muter, est-ce s'imposer ?](#)
- [Daniel Lincot, directeur de l'Institut de recherche et développement sur l'énergie photovoltaïque « La caractérisation jouera un rôle capital dans la course au rendement »](#)
- [12 - Ordinateurs : l'après-silicium](#)

Articles

[populaires récents](#)

- [Le rendez-vous incontournable des amoureux de la science](#)
- [DAVID CHALMERS « La conscience, concept universel comme le temps ou l'espace »](#)
- [L'ORIGINE DU PALUDISME](#)
- [Le cycle de l'eau](#)
- [L'étrange transparence du cristallin](#)

au programme

[agenda événements débats blogs prix/nominations](#)

- [Cette année, le don de moelle osseuse recrute au masculin \(du 14 au 20 mars 2016\)](#)
- [Conférence le 19 novembre - Un siècle de relativité générale : des trous noirs au big bang, et au-delà...](#)
- [1ère édition du Grand Chantier de l'Info, rencontre entre science, journalisme et numérique, les 10 et 11 octobre](#)
- [Le Paris de l'Avenir s'expose sur les Berges de Seine du 12 septembre au 4 octobre 2015](#)
- [1ère édition du S3Odéon, conférence sur l'avenir de la santé, le 12 septembre](#)

Ressources

[audios définitions questions sites web vidéos](#)

- [La lumière quantique](#)
- [La nouvelle histoire de l'Homme](#)
- [Neandertal](#)
- [Sciences à risque](#)
- [La biodiversité](#)

Nuage de tags

[horloge atomique](#), [bombe atomique](#), [la naissance de la bombe atomique française](#), [spectre atomique](#), [cancer](#), [animaux détectent maladies](#), [\[INSERT_PASSBACK\]](#), [expériences sur la relativité du temps](#), [épidémie](#), [neurosciences cognition](#), [combustion de l'oxygène dans l'eau](#), [sépulture](#), [énergie renouvelable](#), [BATTERIE](#), [résine](#), [champ magnétique](#), [génétique](#), [flore intestinale et alimentation](#), [microalgue](#), [SUPERCONDENSATEUR](#)

Cahiers Spéciaux

[Chercheurs d'énergie](#) [IRSTEA](#) [Université de Lyon](#) [De la météo au climat](#)

- [L'accès à l'énergie et la précarité énergétique](#)
- [L'hydroélectricité](#)
- [L'hydroélectricité](#)

- [Valorisation énergétique des déchets](#)
- [La Transformation du pétrole](#)

En kiosque

[le mensuel](#) [les dossiers de La Recherche](#)

- [le sommaire](#)
-
-
- [l'édition numérique](#)
- [trouver en kiosque](#)
-



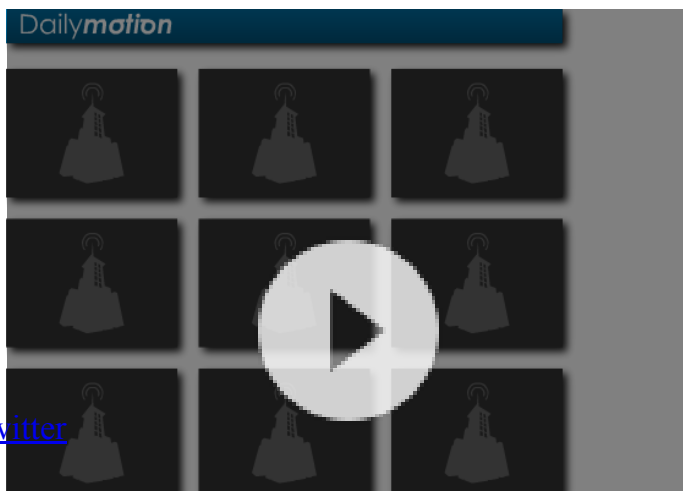
Les blogs de La Recherche
[populaires](#) [récents](#)

- [Les premiers Européens](#)
- [En direct de Planck/Herschel](#)
- [Sprint lunaire](#)
- [Mission balouchithère](#)
- [Opéra Cosmique](#)

www.lesgrandsdebats.fr
[débats](#) [thématiques](#)

- [Wikipédia est-elle encore crédible ?](#)
- [La science est-elle soluble dans la démocratie ?](#)
- [Les neurosciences doivent-elles entrer au tribunal ?](#)
- [Doit-on interdire l'autisme aux psychanalystes ?](#)

Vidéos



**La Recherche**

@maglarecherche

Par quels mécanismes neuronaux le sommeil consolide-t-il la mémoire ? Réponse dans le dossier "Mémoire & sommeil" du nouveau [@maglarecherche](#)

23 h

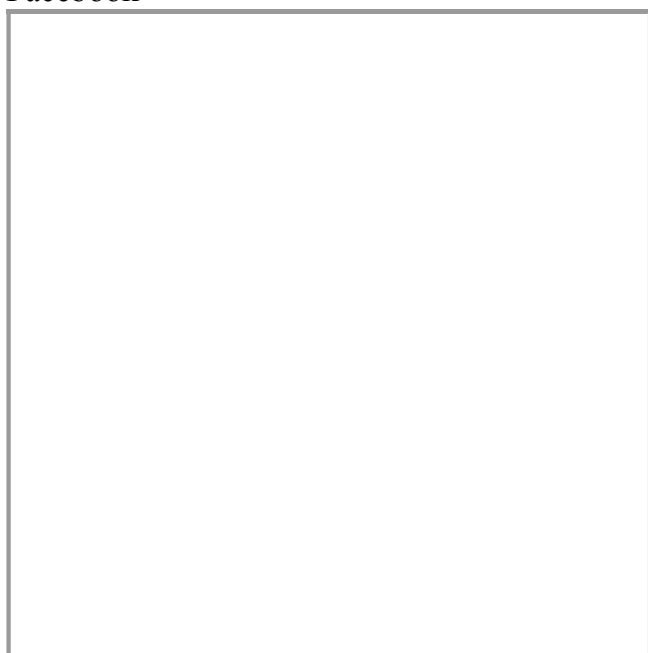
**La Recherche**

@maglarecherche

Le nouveau numéro de [@maglarecherche](#) est en kiosque. En une : "Mémoire et sommeil" larecherche.fr/mensuel/512

26 Mai

Facebook



Commentaires

populaires récents

- [Les hybrides sont toujours stériles](#) (2)
- [1. HÉLÈNE MIALET : « Stephen Hawking est l'opposé du génie solitaire »](#) (2)
- [Une vision corrosive du progrès scientifique](#) (1)
- [Le monde quantique. Les nouvelles frontières de la physique](#) (1)
- [7 - L'hérédité sans gènes](#) (1)

Newsletters

Qui sommes nous ?



La Recherche est un magazine mensuel français couvrant l'actualité des sciences. [[en savoir plus](#)]

Mensuel

Recevez chaque mois à date de parution un courriel sur le dernier [numéro à paraître](#)

Édition numérique

Découvrez gratuitement, en version numérique, l'intégralité de ce dossier sur [le sommeil](#).



Dossiers

Recevez une fois tous les deux mois [la newsletter de parution](#) des *Dossiers de La Recherche*.

[Historia](#)

[L'Histoire](#)

[La Recherche](#)

[Le Magazine-Littéraire](#)

[Les Grands Débats](#)

[Le Point](#)

[© Sophia Publications](#)

[Mentions légales](#)

[Foire aux questions](#)

[Nous Contacter](#)

[<!---->](#)