Science Allemagne

SCIENCE ALLEMAGNE

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Dossier d'information du Service pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France en Allemagne – Octobre 2008

Les technologies solaires de production d'électricité

Photovoltaïque et solaire thermodynamique en Allemagne : avancées de la recherche allemande, mesures de soutien, perspectives industrielles

Directeur de publication : Dr. Ing. Jean-François Dupuis
Directeur de la rédaction : Arnaud Bertrand
Traduction : Jana Ulbricht
Photos de couverture : Centre Helmholtz de Berlin (en haut à gauche), SolarMilennium AG (en haut à droite), http://mescoupsdecoeur.centerblog.net/1192166-LEVER-DU-SOLEIL (en bas à gauche), Concentrix Solar GmbH (en bas à droite)

Publication gratuite de l'Ambassade de France en Allemagne. Tout ou partie de ce numéro ne peut être diffusé sans autorisation expresse du Service pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France en Allemagne.
Rédaction. Ambassade de France en Allemagne - Service pour la Science et la Technologie
Adresse postale : Pariser Platz 5, D-10117 BERLIN
Tél:+49 30 590 039 000, Fax:+49 30 590 039 265, Internet: www.wissenschaft-frankreich.de, Mél: sciencetech@botschaft-frankreich.de

Contenu

Préface 3

PARTIE I : le photovoltaïque

La loi sur les énergies renouvelables (EEG) et la politique de la recherche : moteurs du succès du photovoltaïque en Allemagne 5

"Solar Valley Germany" : Perspectives de l'industrie photovoltaïque en Allemagne..9

Recherche sur les prochaines générations de cellules solaires 13

Le photovoltaïque à concentration – une technologie au seuil de la commercialisation 17

Les applications de la technologie laser dans le photovoltaïque : une combinaison efficace porteuse de nouveaux concepts.....20

Le photovoltaïque organique – Des films minces pour une électricité solaire abordable.....25

L'électricité photovoltaïque, porteuse d'avenir : son rôle dans l'approvisionnement énergétique du futur.....28

PARTIE II : les centrales solaires thermiques à concentration

Centrales solaires thermiques à concentration : le soutien à la recherche du gouvernement fédéral.....31

Les priorités de la recherche appliquée sur les systèmes solaires thermodynamiques 33

Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques pourront bientôt remplacer les centrales conventionnelles – à condition qu'un cadre politique adapté soit mis en place 37

Préface

A l'heure de la construction d'une nouvelle stratégie énergétique et climatique pour l'Europe, le développement des énergies renouvelables est présenté comme une nécessité pour basculer vers une économie durable, peu carbonée. Ainsi, l'UE s'est fixée comme objectif communautaire de satisfaire 20% de sa demande en énergie finale d'ici 2020 à partir d'énergies renouvelables.

Pour nombre d'experts, les technologies solaires électriques sont destinées à jouer un rôle important dans le futur mixe énergétique mondial, à l'horizon 2050. Dans la lutte pour la réduction des coûts de production de l'électricité solaire, l'Allemagne fait figure de modèle en allouant chaque année plusieurs dizaines de millions d'euros à la recherche dans les domaines du photovoltaïque et des systèmes solaires thermiques à concentration, et en favorisant les investissements privés.

Si le photovoltaïque ne couvre aujourd'hui qu'une part infime de la demande électrique mondiale, les taux de croissance actuellement observés (de l'ordre de 40%) témoignent d'un réel changement de cap. Ainsi, l'entreprise Solarworld estime qu'en Allemagne, cette technologie devrait permettre de satisfaire environ 10% de la consommation brute d'électricité d'ici 2020. Parallèlement, les coûts croissants des énergies fossiles remettent les centrales solaires thermodynamiques et leurs applications au goût du jour et laissent présager un bel avenir pour des entreprises allemandes leaders telles que SolarMillennium.

Dans ce contexte, la présente édition de ce Science-Allemagne donne la parole à un certain nombre d'experts allemands du domaine pour faire le point sur la politique de la recherche en Allemagne, passer en revue les avancées technologiques actuelles, et donner un aperçu des perspectives industrielles.

La loi sur les énergies renouvelables (EEG) et la politique de la recherche : moteurs du succès du photovoltaïque en Allemagne

Joachim Nick-Leptin et Mareike Welke, Service en charge de la recherche et du développement dans le domaine des énergies renouvelables, Ministère fédéral de l'environnement (BMU), Berlin

Joachim Nick-Leptin, né en 1962, a fait des études en sciences économiques à Sarrebruck, à Ann Arbor (USA) et à Paris. Depuis 1991, il a travaillé dans différents services du ministère fédéral de l'Environnement, de la Chancellerie fédérale ainsi que de la représentation permanente de la République fédérale d'Allemagne auprès de l'Union Européenne à Bruxelles. Depuis juin 2004, il dirige le service de promotion de la recherche sur les énergies renouvelables au sein du BMU.

Mareike Welke, née en 1970, a fait des études de sciences économiques, de politique et de l'histoire à Cologne et Tucumán, en Argentine. Elle a travaillé pendant plusieurs années pour une société de conseil spécialiste des énergies renouvelables. Elle est par ailleurs l'auteur de nombreux articles sur le sujet dans différentes revues spécialisées. Depuis 2005, elle travaille comme Attachée auprès du ministère fédéral de l'Environnement.

Le marché du photovoltaïque (PV) connaît un boom dans le monde entier. Il atteint actuellement des taux de croissance annuels de 40%. En 2007, 2.500 mégawatts de modules photovoltaïques ont été fabriqués dans le monde. En termes de production de modules, l'Allemagne occupe le deuxième rang mondial, juste derrière le Japon.

Et en termes de capacité annuelle installée, l'Allemagne occupe de loin la première place. Près de la moitié des modules installés dans le monde en 2007 l'ont été en Allemagne. Ainsi, la pays possède, avec le Luxembourg, la capacité installée pro capita la plus élevée au monde : presque 50 watts par habitant fin 2007.

Moteur de ce succès : la loi sur les énergies renouvelables

L'entrée en vigueur de la loi sur les énergies renouvelables (EEG) en avril 2000 a permis d'établir les conditions de cette évolution positive du marché. Cette loi définit des tarifs préférentiels de rachat de l'électricité produite à partir d'énergies renouvelables (comme l'éolien, le photovoltaïque, la biomasse) à des taux fixes, valables pendant 20 ans en général. Les surcoûts induits par cette loi sont répercutés sur la facture des consommateurs d'électricité. La loi EEG a été déjà copiée par 40 pays. En Allemagne, elle a créé d'excellentes conditions pour le développement des énergies renouvelables en garantissant la sécurité des investissements. Cette loi a contribué à la forte croissance du secteur PV. Dans les nouveaux Länder en particulier, de nombreuses entreprises ont vu le jour et de nombreux emplois ont été créés.

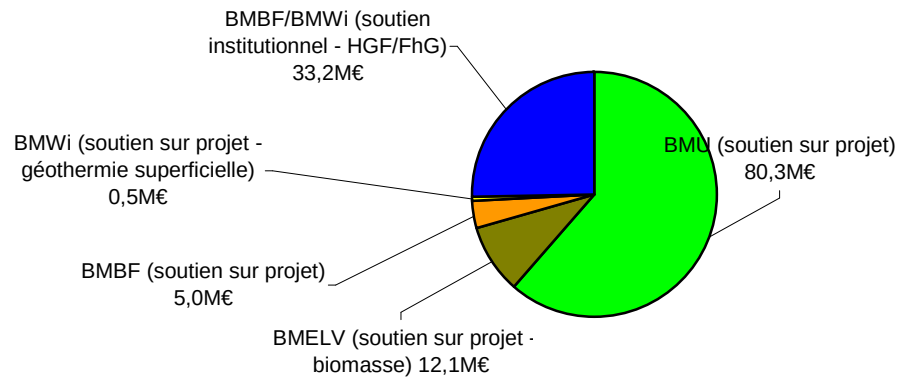
Dès le début, l'EEG a prévu une dégressivité du taux d'indemnisation. En effet, la baisse graduelle du taux d'indemnisation stimule l'innovation et donc l'augmentation continue de la compétitivité. Adopté en décembre 2007, le projet gouvernemental de modification de la loi EEG prévoit une dégressivité accrue du taux d'indemnisation de l'électricité PV, de manière à prendre en compte la diminution de son coût de production. Le fait que les entreprises investissent de manière ininterrompue montre que la mesure envisagée est économiquement acceptable. La disponibilité croissante du silicium contribuera également à accélérer la réduction des coûts.

Moteur de ce succès : le soutien à la recherche

Le gouvernement fédéral n'encourage pas seulement la commercialisation, mais aussi la poursuite du développement technologique du photovoltaïque. Le gouvernement souhaite ainsi contribuer à ce que les coûts de l'énergie photovoltaïque baissent le plus vite possible. Il souhaite que les entreprises et les instituts de recherche et allemands assurent et consolident leur position de leader technologique afin de s'imposer face à la concurrence internationale.

Les moyens publics consacrés à la recherche et au développement dans le domaine du photovoltaïque sont mis à disposition aussi bien par le ministère fédéral de l'Environnement (BMU) que par le ministère fédéral de l'Enseignement et de la Recherche (BMBF). D'après les calculs du BMU, la totalité des dépenses du Bund dédiées à la recherche et au développement de toutes les formes d'énergies renouvelables devrait s'élever en 2007 à environ 131 millions d'euros.

Dépenses 2007 du Bund pour la recherche sur les énergies renouvelables (total : 131,1M€) - Source : BMU

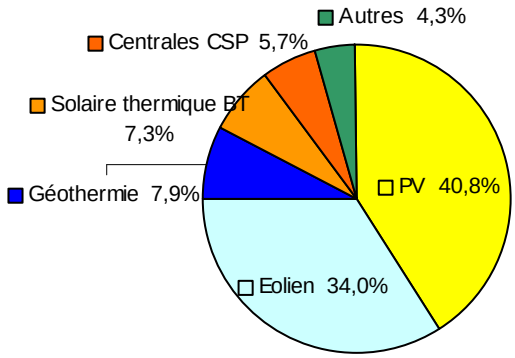


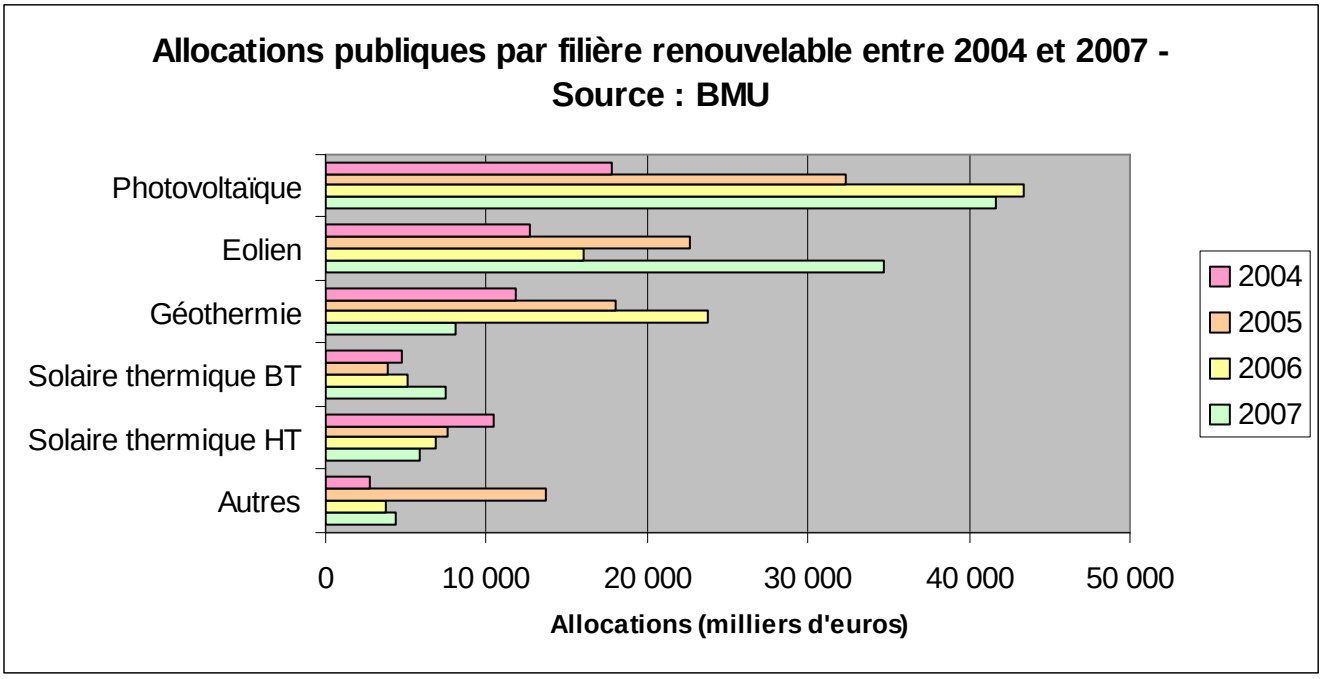
Le BMBF soutient les grands centres de recherche, comme par exemple l'Institut Hahn-Meitner de Berlin (HMI), le centre Helmholtz de recherche de Jülich (FZJ) ou l'Institut Fraunhofer des systèmes d'énergie solaire à Freiburg (ISE), par le biais d'un financement de base. L'accent est mis ici sur la recherche fondamentale. En 2007, le BMBF a alloué un financement public de base de presque 30 millions d'euros à la recherche sur le PV. Le soutien aux projets PV de recherche va être encore renforcé dans le cadre du programme „recherche fondamentale énergie 2020+", publié en mars. La priorité sera mise sur les technologies à couches minces qui présentent un potentiel concrétisable à moyen et long terme.

De son côté, le BMU soutient les projets de recherche appliquée dans le domaine du photovoltaïque et des autres énergies renouvelables. En 2007, le BMU a autorisé et financé le lancement de nouveaux projets de recherche sur les énergies renouvelables avec un budget total de 102 millions d'euros. Une grande partie de cette somme, soit 41,6 millions d'euros (40,8 %), a été investie dans le photovoltaïque. Ce choix se justifie par le grand potentiel d'innovation du PV.

Dans les prochaines années, le budget du BMU réservé à la promotion de la recherche va encore augmenter. La stratégie High-tech du gouvernement fédéral prévoit une augmentation des moyens financiers de 5 millions d'euros chaque année jusqu'en 2009. Ils seront complétés par d'autres moyens issus de l'initiative pour la protection climatique du gouvernement fédéral. Ainsi, les projets de recherche sur les énergies renouvelables disposeront de 103 millions d'euros en 2008 et 110 millions d'euros en 2009.

Répartition du budget recherche 2007 du BMU par filière renouvelable - Source : BMU

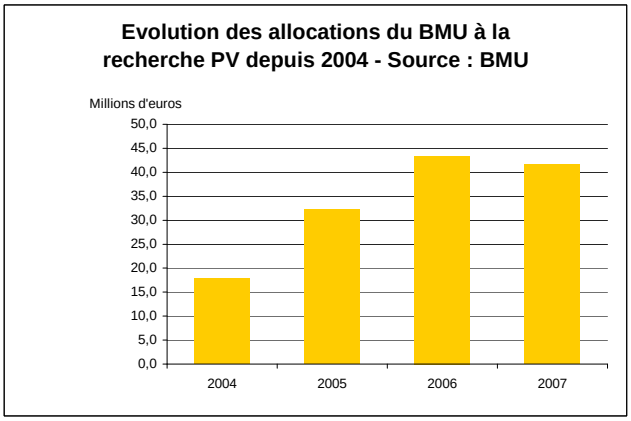




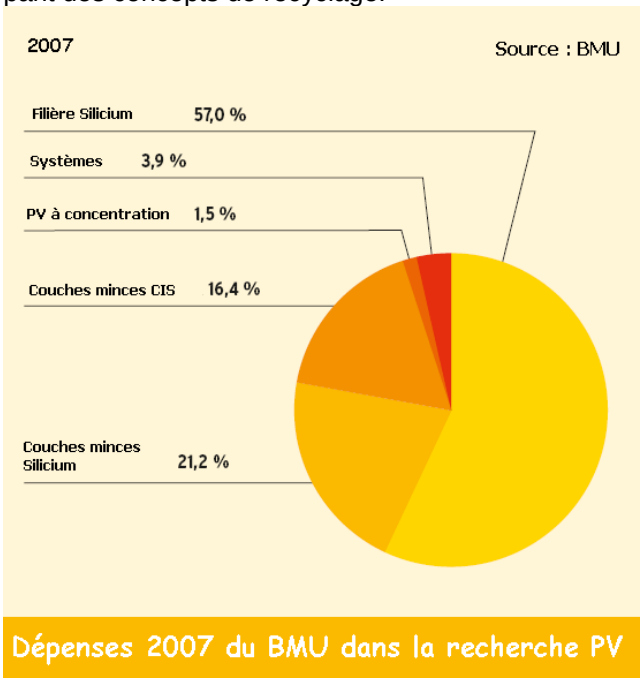
Les priorités de la recherche photovoltaïque

Le ministère fédéral de l'environnement fixe les objectifs et les priorités du soutien de la recherche tous les deux ans, après consultation de personnalités de l'industrie et de la recherche. L'objectif principal est la diminution des coûts : grâce à une augmentation du rendement, une utilisation plus efficace des ressources, ou bien encore en recourant à de nouveaux matériaux ou à de nouveaux procédés de fabrication.

La plus grande part du financement accordé au PV en 2007 (57 %) a bénéficié à la filière du silicium cristallin, actuellement dominante sur le marché. Les technologies couches minces et les concepts alternatifs tels que le PV à concentration sont également financés, de même que la recherche sur les systèmes PV et d'autres thèmes interdisciplinaires.



Ces dernières années, le secteur du photovoltaïque a été fortement marqué au niveau mondial par une pénurie en silicium traité. La recherche s'est emparée de ce problème. Plusieurs projets étudient des modes de production alternatifs et les possibilités d'utilisation plus efficace de cette matière première, notamment en réduisant les pertes en matériaux et en développant des concepts de recyclage.



Dépenses 2007 du BMU dans la recherche PV

Le BMU attache beaucoup d'importance à ce que les résultats de la recherche soient rapidement transférés à l'industrie. Le centre d'évaluation du photovoltaïque (PV-TEC) de Freiburg y contribue de façon significative. Créé avec le soutien du BMU, ce centre permet aux producteurs de cellules PV à base de

silicium ainsi qu'aux fabricants de systèmes PV de tester et de développer leurs produits. Ainsi, la lacune entre le laboratoire et la chaîne de montage a été comblée. Un autre exemple est la Concentrix Solar GmbH, un essaimage d'entreprise de l'Institut Fraunhofer des systèmes d'énergies solaires (ISE) à Freiburg. En janvier 2008, pour avoir développé avec succès la technologie innovante du PV à concentration, Concentrix s'est vue décerner le prix pour l'innovation par l'industrie allemande. Le ministère fédéral de l'environnement a soutenu le développement de cette technologie à l'institut ISE pendant de nombreuses années.

Perspectives

L'objectif du soutien à la recherche reste une diminution constante des coûts du photovoltaïque de manière à améliorer les conditions nécessaires à une exploitation au niveau mondial du grand potentiel que représente cette technologie. Un autre objectif est l'intégration du photovoltaïque dans le système d'approvisionnement énergétique existant. De nouvelles applications possibles émergent. Outre la pure production d'électricité, les systèmes photovoltaïques peuvent remplir d'autres fonctions telles que la stabilisation du réseau, le filtrage et la gestion de la demande. Ainsi, ils contribuent globalement à l'optimisation du système d'approvisionnement en énergie.

Contacts

Joachim Nick-Leptin
BMU, Berlin
Téléphone +49 (0) 30 18 30 53 650
Email joachim.nick-leptin@bmu.bund.de

Mareike Welke
BMU, Berlin
Téléphone +49 (0) 30 18 30 53 653
Email mareike.welke@bmu.bund.de

"Solar Valley Germany" :
Perspectives de l'industrie photovoltaïque en Allemagne

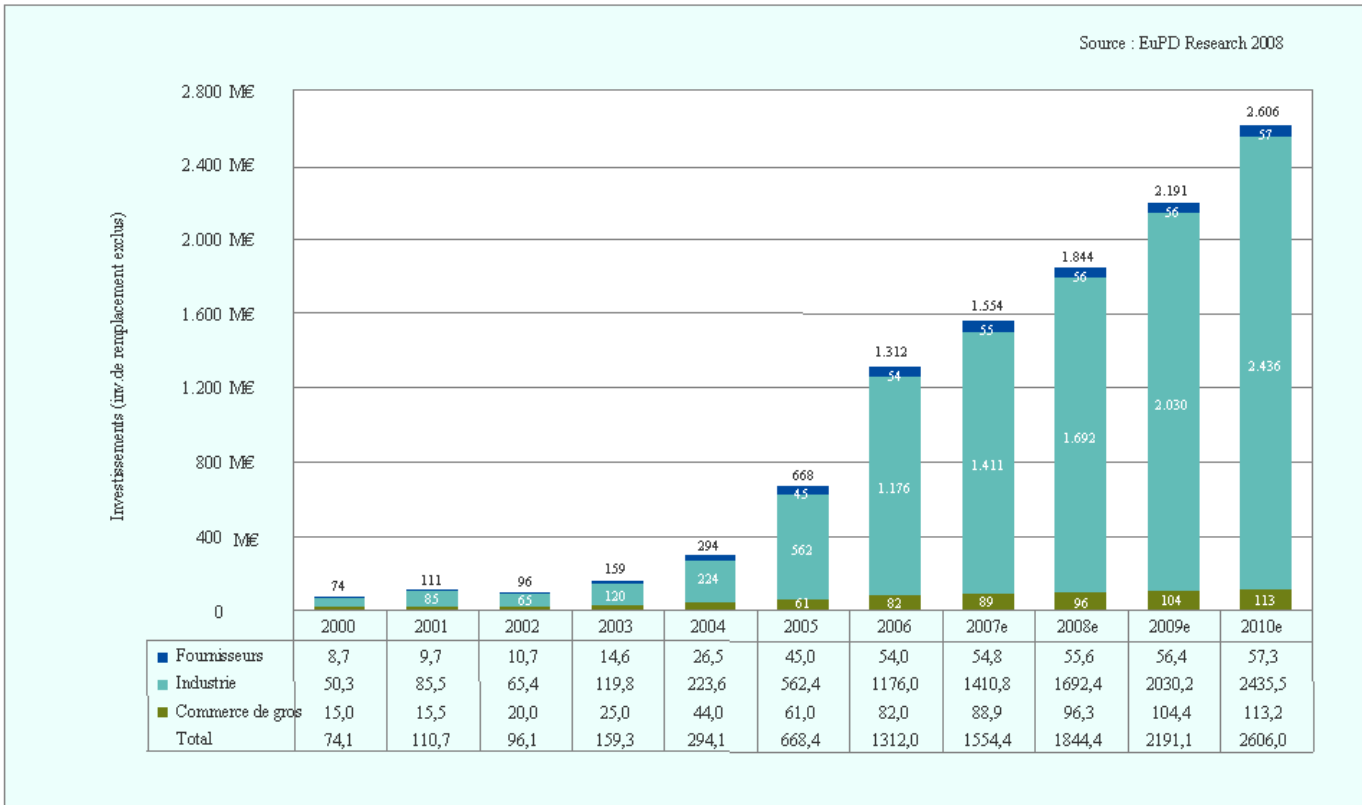
Dipl.-Volksw. Markus A.W. Hoehner, EuPD Research Bonn

EuPD Research est un prestataire international de services complet spécialisé dans l'étude des marchés et des relations commerciales inter-entreprises. Il s'appuie sur un centre professionnel de consultation multilingue. Le département Energy & Utilities a été crée en 2002. Il étudie les développements actuels des marchés de l'énergie aussi bien en Allemagne qu'à l'international. Il a acquis en particulier des compétences dans le secteur de l'énergie solaire. Outre les activités classiques de recherche et de conseil à l'industrie, aux institutions et associations, les compétences d'EuPD Research dans ce secteur à forte croissance s'étendent de l'élaboration d'expertises et de l'évaluation du potentiel économique de produits nouveaux ou existants aux analyses de situations dans le cadre des processus de restructuration. Il réalise également des études de satisfaction de la clientèle et du personnel. Jusqu'à présent, il a mené plus de 180 projets de recherche dans le domaine „International Solar".

La loi de promotion des énergies renouvelables (loi EEG) et une haute acceptance socio-politique ont permis le développement d'un marché du photovoltaïque (PV) attrayant en Allemagne, pays aujourd'hui leader mondial de cette industrie. Environ 75 entreprises de production PV sont actuellement implantées en Allemagne, parmi lesquelles on compte de plus en plus d'entreprises internationales. La loi EEG a rendu possible une sécurité d'investissement dont les entreprises ont profité. Elles ont investi non seulement dans leur actif, mais aussi dans leur expansion internationale ainsi que dans la recherche et le développement (R&D). Les principaux résultats de l'étude « expertise du photovoltaïque en Allemagne » sont présentés dans ce qui suit. Cette étude a été réalisée par l'EuPD Research en coopération avec l'Institut de recherche économique ifo et repose sur la consultation de 345 entreprises de l'ensemble de la filière.

Investissement de l'industrie photovoltaïque

Les entreprises PV sont contraintes de réaliser d'importants investissements pour grossir et conquérir de nouveaux marchés : le but recherché est d'élargir les capacités de production ainsi que de développer de nouveaux produits et procédés de fabrication. Actuellement, les investissements sur le marché photovoltaïque mondial visent essentiellement l'augmentation des capacités de production à tous les niveaux de la branche. Ainsi, d'ici 2010, les filières silicium et couches minces devraient avoir totalisé plus de 22 GWc de capacités supplémentaires.



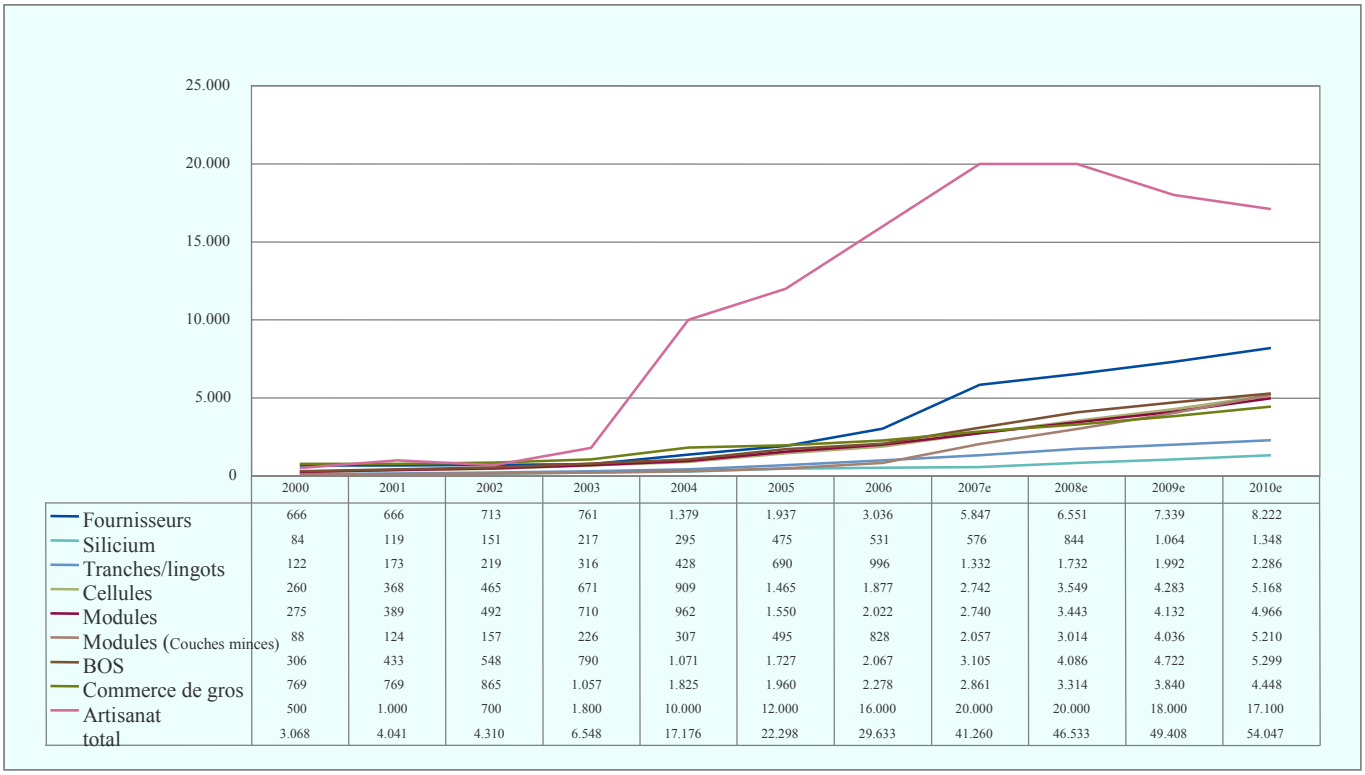
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007e	2008e	2009e	2010e
Fournisseurs	8,7	9,7	10,7	14,6	26,5	45,0	54,0	54,8	55,6	56,4	57,3
Industrie	50,3	85,5	65,4	119,8	223,6	562,4	1176,0	1410,8	1692,4	2030,2	2435,5
Commerce de gros	15,0	15,5	20,0	25,0	44,0	61,0	82,0	88,9	96,3	104,4	113,2
Total	74,1	110,7	96,1	159,3	294,1	668,4	1312,0	1554,4	1844,4	2191,1	2606,0

La valeur nette des investissements réalisés en 2006 par les producteurs allemands PV s'est élevée à 1,2 milliards d'euros, ce qui correspond à 26% du chiffre d'affaires. En 2003, c.-a.-d. avant la modification de la loi EEG en 2004, les investissements étaient dix fois moins élevés qu'ils l'ont été en 2006. En 2007, la somme investie s'est élevée à environ 1,7 milliards d'euros et devrait passer à environ 2,7 milliards d'euros en 2010. Ces investissements servent en partie à des acquisitions ou à des participations dans des entreprises, en particulier dans le domaine des technologies couches minces. Cependant, la priorité est mise sur l'augmentation des capacités de production à tous les niveaux de la filière. D'ici 2010, le secteur photovoltaïque en Allemagne souhaite porter les capacités de production des cellules PV à près de 3 GWc (+111 %), des modules solaires cristallins à 2,2 GWc (+145 %), des modules couches minces à 1,5 GWc (+458 %), des tranches de silicium (« Wafer ») à 2,9 GWc (+139 %). Le secteur compte également accroître ses capacités de production de silicium et les faire passer à 27.250 tonnes par an (+243 %). Concernant la production des tranches de silicium, des cellules, des modules cristallins et des modules à couches minces, la position dominante de l'est de l'Allemagne devrait encore se renforcer.

Les sous-traitants jouent un rôle important dans la réalisation des ambitieux projets d'expansion de l'industrie photovoltaïque allemande. L'intégration du photovoltaïque dans la stratégie d'entreprises de sous-traitance actives dans le domaine de la construction mécanique et des équipements a déjà, dans le passé, contribué de façon décisive à la croissance du secteur photovoltaïque. Cette tendance se poursuivra à l'avenir car la plupart des entreprises souhaitent rester en Allemagne.

L'emploi dans le secteur PV

L'augmentation des investissements prévue pour les prochaines années aura également d'ici 2010 des conséquences sur l'emploi dans le domaine PV. A la fin de l'année 2007, le secteur photovoltaïque en Allemagne employait environ 42.625 personnes - dont près de 50 % de techniciens -, soit 13.000 de plus que l'année précédente. Depuis la modification de la loi EEG en 2004, 36.000 nouveaux emplois ont ainsi été créés. Le nombre total d'emplois devrait atteindre 56.000 d'ici 2010.



	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007e	2008e	2009e	2010e
Fournisseurs	666	666	713	761	1.379	1.937	3.036	5.847	6.551	7.339	8.222
Silicium	84	119	151	217	295	475	531	576	844	1.064	1.348
Tranches/lingots	122	173	219	316	428	690	996	1.332	1.732	1.992	2.286
Cellules	260	368	465	671	909	1.465	1.877	2.742	3.549	4.283	5.168
Modules	275	389	492	710	962	1.550	2.022	2.740	3.443	4.132	4.966
Modules (Couches minces)	88	124	157	226	307	495	828	2.057	3.014	4.036	5.210
BOS	306	433	548	790	1.071	1.727	2.067	3.105	4.086	4.722	5.299
Commerce de gros	769	769	865	1.057	1.825	1.960	2.278	2.861	3.314	3.840	4.448
Artisanat	500	1.000	700	1.800	10.000	12.000	16.000	20.000	20.000	18.000	17.100
total	3.068	4.041	4.310	6.548	17.176	22.298	29.633	41.260	46.533	49.408	54.047

En 2007, les deux tiers des emplois dans ce secteur se trouvaient dans l'ouest de l'Allemagne et un tiers dans l'est de l'Allemagne (les nouveaux länder et Berlin. La différenciation par filière donne un résultat différent. L'analyse de la répartition régionale des emplois tourne nettement en faveur de l'est. C'est là qu'environ 60 % des emplois industriels ont été créés. En prenant en compte la différence de taille des marchés du travail à l'est et à l'ouest, l'industrie PV est même 8,37 fois plus importante à l'est. L'industrie PV s'oriente vers des régions peu développées industriellement et caractérisées par un taux de chômage élevé en mobilisant un „capital humain" jusqu'alors non-utilisé. Notamment les régions autour

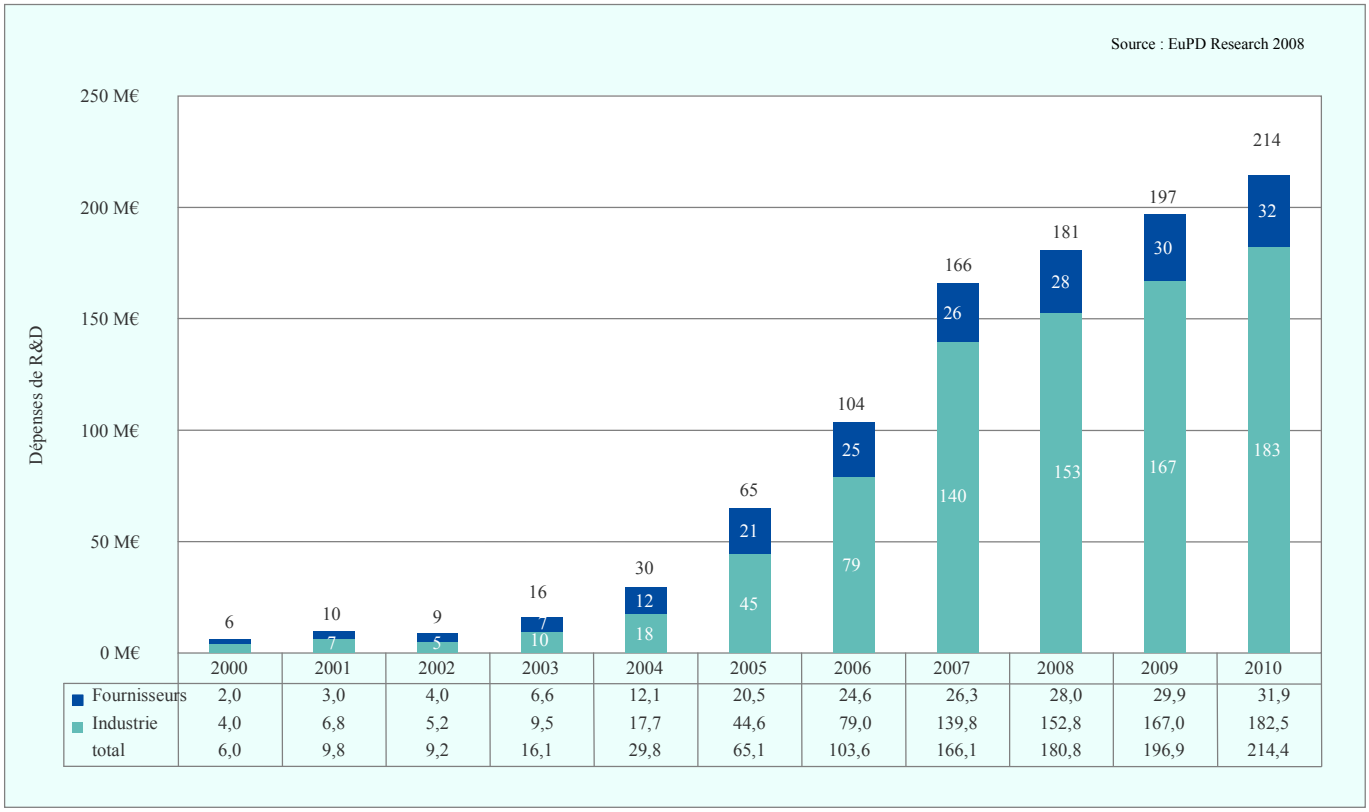
de Berlin, Thalheim, Erfurt/Iéna ainsi que Dresde/Leipzig et Chemnitz continueront à profiter de cet essor. Actuellement, le taux de chômage s'élève dans ces régions à 14,2 % en moyenne [source : BA07, agence fédérale du travail]. En ce qui concerne les places d'apprentissage, l'offre et la demande sont encore loin de coïncider. Dans la ville de Francfort-sur-l'Oder, le rapport offre-demande s'élève même à 79,4 % pour l'année 2006, et occupe, de ce point de vue, la seconde plus mauvaise place en Allemagne. Il reste maintenant à voir à quel point les entreprises de sous-traitance s'implanteront à l'est. La plupart des sous-traitants proviennent actuellement de la construction mécanique classique, de l'industrie des métaux ou du verre, et siègent dans le sud de l'Allemagne. La majorité des entreprises de gros dans le domaine PV et de l'industrie manufacturière est également implantée au sud, à proximité des zones de débouchés.

L'argument du manque d'ingénieurs est souvent mis en avant comme un facteur limitant la croissance économique. Selon les entreprises PV, la pénurie de main d'œuvre ne freine cependant pas encore la croissance du secteur, car celui-ci a pu recruter du personnel issu de branches technologiques cousines. Mais le problème se posera sans aucun doute à moyen ou à long terme. Le besoin en diplômés de l'enseignement supérieur est beaucoup plus grand dans l'industrie PV que dans les autres filières d'énergies renouvelables. 21 % des employés possèdent un diplôme universitaire et 3 % un titre de docteur. Les entreprises doivent trouver elles-mêmes des solutions pour couvrir leur besoin en personnel qualifié et empêcher à long terme que ce personnel se raréfie. Par exemple, en s'adressant directement aux ingénieurs et en leur offrant des conditions attrayantes. La collaboration entre politique, science et industrie est encore loin d'être satisfaisante. La possibilité de choisir le photovoltaïque comme spécialité ou en tout cas comme un point fort est rarement donnée aux étudiants.

Dépenses de recherche et de développement dans le secteur PV

Les dépenses pour la recherche et le développement dans ce secteur sont de plus en plus importantes. Les investissements des producteurs et des sous-traitants sont passés de près de 30 millions d'euros en 2004 à environ 176 millions d'euros en 2007. Ces investissements ont été réalisés essentiellement sous l'impulsion des acteurs les plus importants. On attend justement de ces derniers une intensification des leurs activités R&D à l'avenir. Le renforcement de la concurrence internationale oblige les entreprises leaders sur le marché à augmenter leurs efforts en terme d'innovation. Les entreprises allemandes sont proches de la frontière technologique. On s'attend donc à une intensification de leurs activités de recherche dans les années à venir. En 2010, les producteurs et les sous-traitants devraient ainsi investir environ 215 millions d'euros.

La recherche du secteur photovoltaïque vise prioritairement une amélioration du rapport performance-prix et de l'efficacité des matériaux. L'augmentation graduelle des dépenses R&D et l'élargissement du



paysage de la recherche photovoltaïque allemande doivent contribuer à assurer la position de leader de l'industrie solaire allemande en traduisant les résultats obtenus en succès industriel.
La gamme des possibilités en terme d'innovation et d'optimisation est déjà large à l'heure actuelle, mais pourrait encore s'élargir notablement à l'avenir. Car les champs de recherche sont destinés à se diversifier. Outre la filière organique et la filière PV à concentration, trois autres technologies devraient entrer à moyen terme en phase d'industrialisation : le PV à fluorescence, les cellules à base de polymères et les cellules nanocristallines.
Hormis les technologies précitées, il n'est pas à exclure que d'autres procédés de fabrication, aujourd'hui encore au stade de la recherche fondamentale, apparaissent sur le marché de la production d'électricité solaire. Actuellement, environ 60 chaires de professeurs, organismes de recherche et institutions extra-universitaires travaillent au développement des technologies solaires en Allemagne.

Conclusion

L'Allemagne est considérée comme le marché PV le plus attractif au monde. Ces dernières années, la haute acceptance socio-politique et le cadre législatif stable ont permis une augmentation constante de la capacité photovoltaïque installée en Allemagne. Les entreprises ont tiré profit de ces conditions favorables pour réaliser des investissements importants, essentiellement dans l'élargissement des capacités de production. 75 entreprises sont actuellement actives dans ce secteur en Allemagne. Les fabricants internationaux sont de plus en plus nombreux. L'Allemagne, en particulier l'Est du pays (les nouveaux länder, Berlin conclu) est ainsi considéré comme le leader mondial.
Du point de vue des acteurs de l'industrie et du commerce de gros, les principaux facteurs macroscopiques expliquant la croissance des entreprises et le développement de l'industrie en Allemagne sont la poursuite du soutien gouvernemental des énergies renouvelables ainsi que le développement global du marché et de la branche. Pour ces mêmes acteurs, la qualité du personnel constitue le facteur de croissance micro-économique le plus important. Dans un marché concurrentiel, les employés qualifiés représentent un fort avantage compétitif par rapport au personnel bon marché, souvent moins bien formé.
Pour atteindre leurs objectifs, les entreprises doivent également dégager une capacité d'autofinancement et disposer des capitaux suffisants.
Le plus grand risque pour les sous-traitants, l'industrie et le commerce de gros résident dans les éventuelles modifications de la législation. Le renforcement de la concurrence représente également un risque important, notamment pour les acteurs du marché qui ne disposent que de faibles capacités de recherche. Le risque d'un trop faible nombre de clients est jugé quant à lui négligeable par l'industrie et les sous-traitants. Apparemment, la plupart des fabricants disposent déjà d'une clientèle diversifiée du point de vue sectoriel et géographique.
Qu'il s'agissent des sous-traitants, de l'industrie ou du commerce de gros, les facteurs externes à l'entreprise (sur lesquels elles n'ont pas d'influence) constituent en général les obstacles les plus importants à la croissance.
En conclusion, les principaux paramètres exogènes sont le cadre législatif, la concurrence nationale et internationale et les situations de pénurie potentielles, notamment de matières premières.

Contacts

EuPD Research
Adenauerallee 134, 53113 Bonn

Téléphone : +49 (0) 228-971 43-0
Fax : +49 (0) 228-971 43-11
info@eupd-research.com
http://www.eupd-research.com

Dipl.-Volksw. Markus A.W. Hoehner (CEO)
Téléphone : +49 (0) 228-971 43-50
m.hoehner@eupd-research.com

Dipl.-Volksw. Christian Schmidt
Téléphone : +49 (0) 228-971 43-24
c.schmidt@eupd-research.com

Recherche sur les prochaines générations de cellules solaires

Dr. Rainer Eichberger, Centre Helmholtz de Berlin pour les matériaux et l'énergie

Le "Centre Helmholtz de Berlin" (HZB) est né de la fusion récente entre le HMI(1) et le BESSY. Le nouvel institut de recherche appartient à la communauté Helmholtz (HGF). L'activité "recherche sur le photovoltaïque couches minces" fait partie du programme "énergies renouvelables" de la HGF. Rainer Eichberger dirige le département "Spectroscopie femtoseconde".

(1) L'Institut Hahn-Meitner est le plus grand institut de recherche en Europe dans le domaine du PV couche mince

---

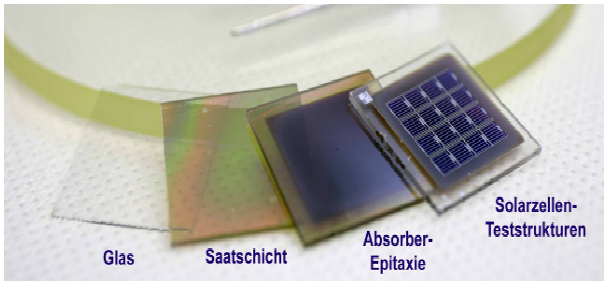
Les recherches actuellement menées sur la prochaine génération de cellules photovoltaïques (PV) poursuivent essentiellement deux buts : la réduction des coûts et la hausse du rendement. Aujourd'hui, le marché PV est dominé par la technologie silicium, coûteuse et caractérisée par des couches d'environ 250 µm d'épaisseur. Les technologies à base de couches minces permettent d'économiser les matériaux et constituent une alternative prometteuse car économique. Le Centre Helmholtz de Berlin s'intéresse aux aspects scientifique et technologique de différents types de cellules PV couche mince.

La création réussie d'entreprises (Q-Cells) et de spin-offs (Sulfurcell) par d'anciens employés du HMI témoigne de l'importance du photovoltaïque au HZB. En coopération avec l'Université technique de Berlin (TU Berlin) et 8 partenaires industriels, le HZB a inauguré récemment un "centre de compétences pour les technologies en couches minces et les nanotechnologies pour le PV".

Cellules PV couche mince à base de silicium cristallin

Les principaux développements en cours au HZB concernent les cellules solaires en couches minces de silicium polycristallin (poly-Si) sur des substrats peu coûteux (par ex. du verre), ainsi que les cellules à hétérojonction silicium amorphe-silicium cristallin (a-Si/c-Si).

La technologie en couches minces de poly-Si est très prometteuse : elle permet une réduction considérable des coûts par rapport aux technologies classiques à base de silicium car elle implique des économies de matériaux et des températures d'élaboration infiniment plus basses. L'objectif est de développer des technologies de production de poly-Si de grande qualité qui soient rapidement industrialisables. Au HZB, des surfaces absorbantes en silicium (~2 µm) sont déposées - par PECVD micro-onde (dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma) ou par EBPVD (dépôt en phase vapeur par faisceau d'électrons) - sur une couche d'ensemencement (ou germe) en silicium polycristallin à gros grains. La qualité structurelle du germe est déterminante pour la qualité globale de la cellule PV. Le germe est obtenu par cristallisation d'une couche en silicium amorphe préalablement déposée sur le substrat en verre. Le procédé, appelé "cristallisation métallo-induite" (ALILE - aluminium-induced layer exchange), repose sur l'utilisation temporaire d'une couche d'aluminium intermédiaire, située entre le substrat en verre et la couche de a-Si. Au cours du processus global a lieu un échange de couches : un germe en poly-Si se forme sur le substrat et supplante l'aluminium, alors déplacé vers la couche supérieure, puis éliminé. Enfin, la cellule est complétée en empilant successivement sur le germe une couche mince en a-Si dite émettrice et une grille de contacts électriques. Si en laboratoire, les rendements de cette nouvelle technologie tournent encore autour de 6%, ils devraient, selon les calculs, pouvoir atteindre les 15%.



Les cellules solaires à base d'hétérostructures de type a-Si/c-Si sont constituées d'une couche mince de silicium amorphe appliquée sur une couche de silicium cristallin. La couche a-Si joue ici aussi la fonction d'émetteur et neutralise les défauts cristallographiques (minimisation des pertes liées aux porteurs de charge libérés par l'absorption photonique). Opérer avec des températures inférieures à 300℃ permet de ménager la fragile surface des tranches (ou wafers) de silicium au moment de la séparation chimique en phases gazeuses du film a-Si. A l'HZB, on attache une grande importance aux recherches menées sur les propriétés physiques de la jonction a-Si/c-Si et sur leur optimisation. Le rendement des cellules "spécimens" s'élève à environ 18%. Selon les simulations informatiques, il devrait être possible de l'améliorer : le rendement de ce type de cellules solaires à base d'hétérostructures devrait pouvoir

atteindre les 24%. Parallèlement, les chercheurs travaillent à la conception de structures de capture de la lumière qui permettent d'éviter les pertes par réflexion, ainsi qu'à l'optimisation du contact électrique des cellules à hétérojonction a-Si/poly-Si avec des matériaux transparents conducteurs.

Coopérations existantes avec la France dans ce domaine : CNRS (Strasbourg) et Saint Gobain Recherche (Paris) dans le cadre du projet européen ATHLET.

Cellules solaires à base d'alliages semi-conducteurs

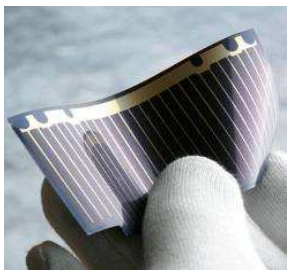
Les travaux du HZB dans ce domaine se concentre sur les alliages semi-conducteurs I-III-VI_2, de structure chalcopyrite, et sur les semi-conducteurs de type III-V.

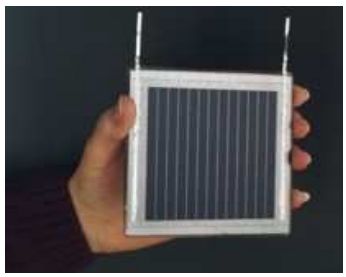
Les cellules solaires couche mince à base d'alliages CIS (Cuivre-Indium-Sulfure/Séléniure) hautement absorbants cumulent les points forts de la technologie couche mince (économe en matériaux) et des cellules solaires conventionnelles en silicium cristallin (haut rendement de conversion). En laboratoire, les cellules de CIS atteignent déjà un rendement de presque 20%, tandis que celui des modules PV commerciaux (par exemple à base de $CuInSe_2$) tourne autour de 10%. Le HZB étudie différentes combinaisons de matériaux de la famille des CIS dans le but d'améliorer encore les rendements et de développer des prototypes de grande taille en vue d'une application industrielle. Côté théorie, les interrogations scientifiques actuelles portent sur des sujets fondamentaux tels que défauts, joints de grain, jonctions et modélisation des cellules. Parallèlement, côté pratique, les étapes élémentaires de la conception technologique des cellules sont optimisées. Sur une ligne de fabrication de cellules minces de CIS, on produit des modules d'une surface allant jusqu'à 30x30 cm^2. Dans le cas des composés contenant du Gallium, les plus hauts rendements sont atteints avec des alliages de séléniure (voir tableau), qu'il est aussi possible de déposer sur des films souples et légers et qui font l'objet d'études pour des applications spatiales.

Matériau absorbant	***Surface du module***	***Rendement de conversion***
$CuInS_2$	5x5 cm^2	10 %
$Cu(In,Ga)S_2$	0.5 cm^2	12.3 %
$Cu(In,Ga)Se_2$	0.5 cm^2	18 %
$Cu(In,Ga)Se_2$	4x8 cm^2 (flexible)	15.0 %

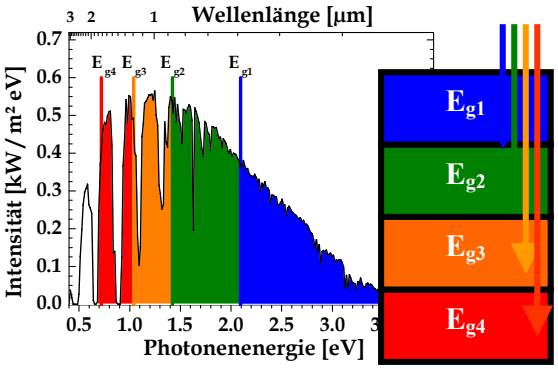
Le Centre Helmholtz de Berlin est l'un des rares instituts de recherche au monde qui étudie également les alliages de $Cu(In,Ga)S_2$. Parmi les matériaux CIS, ce type d'alliage est celui qui possède les plus hauts rendements théoriques. Il a été démontré que ces alliages pouvaient être obtenus par des procédés extrêmement rapides et stables. Ces matériaux sont d'ores et déjà utilisés pour la production de modules par l'entreprise allemande “SULFURCELL Solartechnik“ (une spin-off du centre HZB). Un objectif à plus long terme est de développer une cellule solaire tandem en superposant deux cellules constituées de composés chalcopyrites différents. Cette technique doit rendre possible l'absorption d'une plage plus large du spectre solaire.

Coopérations avec la France dans ce domaine : Saint-Gobain Recherche, CNRS / École nationale supérieure de chimie de Paris (projet européen ATHLET coordonné par le HZB) ; un 2ème projet européen (LARCIS) inclut des coopérations avec Saint-Gobain Recherche, Electricité de France et le CNRS.





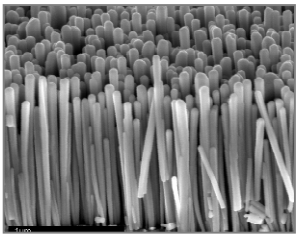
Les cellules solaires à jonctions multiples composées d'alliages semi-conducteurs de type III-V détiennent le record du monde absolu de rendement avec des valeurs supérieures à 40%. Ces rendements étonnants résultent de la mise en série de plusieurs cellules solaires élémentaires différentes (que l'on fait croître par épitaxie sur un wafer). Il est possible d'assembler les éléments (III et V) de telle façon qu'un grand choix de matériaux semi-conducteurs (caractérisés par différentes valeurs de bande d'énergie interdite ou *gap*) soit possible pour chaque cellule élémentaire. Ainsi, des photons de basse, moyenne et haute énergie du spectre solaire peuvent être convertis en électricité (voir figure ci-après). Ces cellules solaires supposent des qualités de matériaux extrêmement élevées (un minimum de défauts), qu'il n'est possible d'obtenir que par épitaxie par jet (ou faisceau) moléculaire (MBE) ou par épitaxie en phase vapeur aux organométalliques (MOVPE).

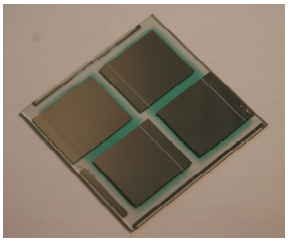


Le HZB développe une cellule tandem capable d'absorber dans le domaine des grandes longueurs d'onde du spectre solaire, un domaine que même la cellule détentrice du record du monde (3 cellules élémentaires superposées) n'exploite pas de manière optimale. L'objectif serait ensuite, par le biais de coopérations internationales, de coupler la cellule tandem du HZB avec l'actuelle championne du monde des cellules, de manière à atteindre des rendements de l'ordre de 50%. Pour réaliser des économies de matériaux, un autre but visé est la fabrication de cellules à base d'alliages de type III-V déposés sur des substrats peu coûteux comme le silicium.

Nouveaux matériaux et structures cellulaires

A long terme, pour relever les défis que posent la croissance constante du marché du photovoltaïque, la recherche de rentabilité économique et le respect de l'environnement et du climat, il est nécessaire de développer de nouveaux concepts et procédés innovants en vue de la fabrication de la prochaine génération de cellules solaires. De ce fait, le HZB mène, à moyen et long terme (horizon de plusieurs dizaines d'années), une recherche pluridisciplinaire sur des combinaisons alternatives de matériaux et sur des technologies alternatives. En utilisant des substrats nanostructurés (voir figure) à base de matériaux semi-conducteurs bon marché (ex : TiO_2, ZnO), il est possible de concevoir une gamme de cellules caractérisées par des couches absorbantes anorganiques et organiques extrêmement minces (cellule ETA pour "Extreme Thin Absorber").





La structuration microscopique conduit à un agrandissement de la surface entre les couches de la cellule solaire et permet une haute absorption de la lumière. Des approches non conventionnelles dans la préparation des cellules, comme le principe des systèmes auto-organisés inspirés d'exemples biologiques, ouvre la voie vers de nombreuses possibilités pour le développement de ces systèmes. De telles couches peuvent être obtenues à très bon marché à basses températures grâce à des procédés chimiques par voie humide et offrent de plus la perspective d'une production en continue (procédé "roll-to-roll"). Par rapport aux cellules conventionnelles en silicium cristallin, les cellules solaires organiques, caractérisées par un meilleur amortissement des coûts et des cycles de vie plus courts, constituent une alternative innovante. Les couches photoactives utilisées sont préparées à partir de molécules organiques disponibles à bas prix sur le marché. Les techniques de dépôt éprouvées utilisées par l'industrie opto-électronique peuvent être adaptées à l'industrie PV. Pour le moment, cette technologie en est encore au stade de l'étude et du développement en laboratoire de cellules solaires de petites dimensions. On atteint actuellement des rendements de 3-4%. A long terme, certains des nouveaux concepts de cellules devraient malgré tout être en mesure d'atteindre les 15% de rendement. Les facteurs limitants sont étudiés au HZI grâce à des méthodes complémentaires d'analyse structurelle et de mesures électriques et optiques. Les technologies couche mince comprennent également les systèmes photoélectrochimiques et photoélectrocatalytiques pour une application dans les piles à combustible. La recherche dans ce domaine se focalise sur le développement de nouveaux alliages pour les électrodes, à base de ruthénium, de sélénium et de carbone par exemple. Ces alliages sont destinés à remplacer le platine extrêmement cher des catalyseurs actuels.

<u>Coopérations avec la France dans ce domaine</u> : le HZB est un des deux instituts allemands représentés dans le réseau européen „OrgaPVnet“, qui compte 22 partenaires principaux, dont le CEA et le CNRS.

Chimie analytique et chimie des interfaces

Le fonctionnement des cellules en couche mince est déterminé principalement par la structure morphologique et électronique des matériaux qui les constituent et de leurs interfaces. Pour la caractérisation des structures microscopiques et électroniques, ainsi que du transport des charges, le HZB a recours à une vaste panoplie d'instruments expérimentaux spécialisés. Les expériences sont menées en lien étroit avec la préparation de cellules complètes ou partielles (traitement des interfaces). La connaissance fondamentale des processus physiques permet ainsi un meilleur contrôle de chacune des phases de la préparation. En plus de nombreuses méthodes électriques et spectroscopiques (résolution temporelle allant jusqu'à la femtoseconde), le HZB dispose en interne des sources neutronique et photonique (BENSC et BESSY) nécessaires à la caractérisation structurelle et énergétique des matériaux photovoltaïques.

Contact

Dr. Reiner Eichberger
HZB, Berlin
http://www.hmi.de

Téléphone +49 (0) 30 18 61 52 874
Email eichberger@helmholtz-berlin.de

Le photovoltaïque à concentration – une technologie au seuil de la commercialisation

Dr Andreas Bett, directeur du département „matériaux – cellules solaires et technologies“ à l'Institut Fraunhofer des systèmes énergétiques solaires (ISE) de Freiburg

Andreas Bett, né en 1962, a obtenu son diplôme de physique, de mathématiques et de sport à l'Université de Freiburg. En 1991, il a soutenu son doctorat de physique à l'Université de Constance. Depuis 1986, il travaille à l'Institut Fraunhofer ISE, notamment dans le domaine du développement des cellules solaires III-V. Il a fortement contribué au développement d'un système PV à concentration, fabriqué aujourd'hui par l'entreprise Concentrix Solar de Freiburg. Depuis 2007, il dirige ce département.

L'avenir de l'approvisionnement énergétique appartient aux énergies renouvelables. En effet, selon un rapport de 2003 du « Conseil consultatif scientifique sur les changements environnementaux mondiaux » du gouvernement fédéral (WGBU), celles-ci pourraient couvrir d'ici 2050 plus de la moitié de la demande mondiale en énergie. Alors que l'éolien, l'hydraulique et la biomasse représentent déjà aujourd'hui une part non négligeable du mixe énergétique national, la production totale d'électricité photovoltaïque reste encore relativement faible. Or, d'ici 20 à 30 ans, le potentiel des autres technologies renouvelables sera largement épuisé. Le photovoltaïque (PV), qui représente aujourd'hui moins d'1% de la production d'électricité, deviendra une technologie de masse, avec une contribution de 20% ou plus. Parmi les plus grands avantages du PV, on compte l'absence totale d'émissions et la possibilité de monter de manière modulaire des installations allant de la taille d'un ongle de doigt à celle de plusieurs milliers de terrains de football. Outre les installations intégrées au bâti, il y aura également des centrales de production isolées.

Il faut dès à présent préparer le terrain pour rendre un tel développement possible. Le principal problème réside dans les coûts. Les cellules solaires sont composées de matériaux semi-conducteurs de haute qualité. En principe, il existe deux manières de concevoir un système PV : soit en installant des cellules solaires sur une grande surface de terrain (Flat Plate) soit en focalisant le rayonnement solaire sur des cellules de petites dimensions grâce à des concentrateurs optiques. Pour la technologie « Flat Plate », on a principalement recours au silicium. Elle connaît une forte croissance en Allemagne depuis l'entrée en vigueur de la loi de promotion des énergies renouvelables (EEG), et dans d'autres pays également.

La technologie à concentration ne nécessite que très peu de ce matériau semi-conducteur relativement cher. Par exemple, grâce aux miroirs de Fresnel capables de concentrer un millier de fois le rayonnement du soleil, il est possible de réduire d'autant la surface du semi-conducteur nécessaire (voir figure 1). Pour convertir un centimètre carré de rayonnement solaire en électricité, il suffit d'une cellule solaire de la taille d'un timbre. Etant données les petites tailles impliquées, on peut se permettre d'employer des cellules solaires de très haute qualité. De plus, le rendement des cellules solaires s'accroît avec la concentration. Non seulement cette technologie autorise une réduction de la surface de semi-conducteur utilisée mais elle permet également une augmentation de l'énergie produite. Alors que les cellules solaires commerciales ont des rendements typiques de 16% à 20%, les cellules à concentration atteignent les 35-40%.

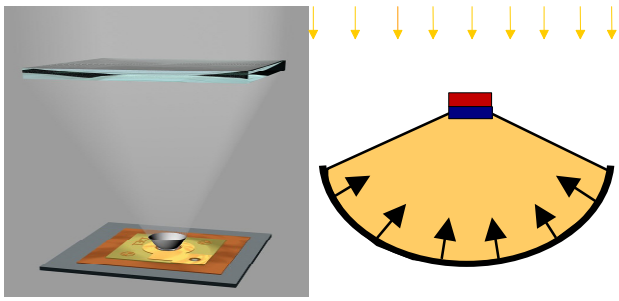


Figure 1 : Principe de fonctionnement de la technologie PV à concentration. A gauche, une lentille concentre le rayonnement solaire sur une cellule de petite taille. A droite, la lumière est concentrée par un miroir parabolique.

Les cellules solaires multi-jonctions hautement performantes

Ces cellules hautement performantes ne sont plus constituées d'un semi-conducteur unique, mais généralement d'une combinaison de matériaux appartenant aux 3ème et 5ème colonnes du tableau de classification périodique des éléments chimiques. Pour cette raison, ils sont qualifiés de semi-conducteurs III-V.

Matériaux typiques : l'arséniure de gallium GaAs, le AlGaAs ou le GaInP. Ces alliages semi-conducteurs de type III-V sont déposés par épitaxie en phase vapeur aux organométalliques (MOVPE) sur des substrats en germanium. La même méthode est appliquée pour fabriquer les célèbres diodes luminescentes également composées de semi-conducteurs III-V.

L'avantage des matériaux III-V, déjà employés dans des applications spatiales, est qu'ils peuvent être empilés de manière à obtenir des cellules multi-jonctions (voir figure 2).

Elles sont capables d'exploiter de manière optimale le large spectre solaire et de le convertir en électricité. Superposées les unes sur les autres, deux ou plusieurs cellules de bandes interdites différentes convertissent séparément et donc plus efficacement les parties rouge et bleue de la lumière. De telles cellules multi-jonctions peuvent être, par exemple, composées de couches minces GaInP/GaInAs. Ces couches minces sont déposées sur des substrats en germanium, stables et peu coûteux, qui peuvent jouer parallèlement le rôle d'une 3ème cellule solaire active. L'Institut Fraunhofer pour les systèmes énergétiques solaire (ISE) de Freiburg travaille activement à cette thématique. Le rendement maximum atteint jusqu'à présent (juillet 2008) par cet institut avec une cellule triple de type III-V s'élève à 37,6% pour une lumière concentrée 1.700 fois. Le record du monde pour ces cellules est de 40,7% et a été atteint par Spectrolab aux Etats-Unis.

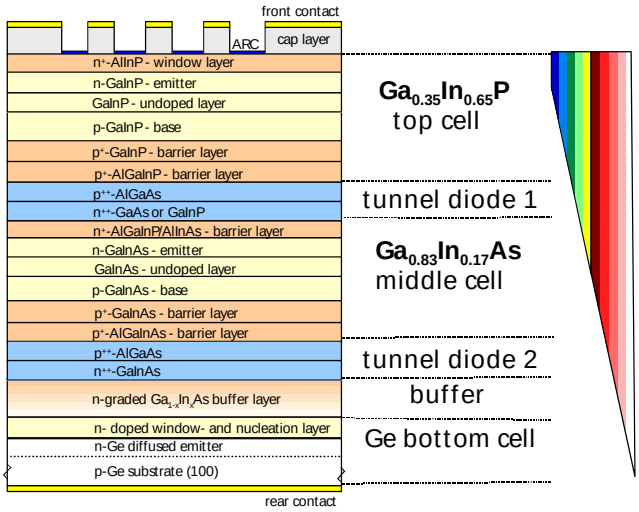
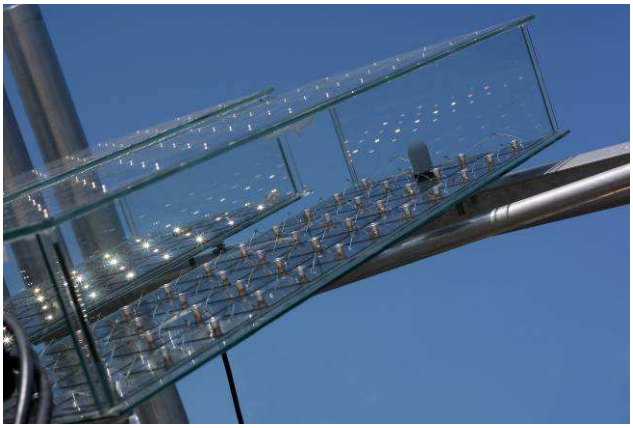


Figure 2 : Structure d'une cellule multiple de type III-V. La lumière bleue est absorbée par la cellule supérieure en GaInP. Via une diode tunnel, cette cellule est connectée électriquement en série à la cellule intermédiaire en GaInAs, qui absorbe la lumière rouge. De la même manière, la cellule intermédiaire est connectée en série à la cellule en germanium, qui convertit, elle, les infrarouges.

Des systèmes PV à haute concentration

Une cellule solaire ne fait toute fois pas une centrale à elle toute seule. Les cellules solaires sont montées en modules grâce à un système optique concentrateur. Les premiers modules à concentration ont été fabriqués au milieu des années 1990 à l'Institut Fraunhofer ISE, en collaboration avec l'Institut Ioffe de Saint-Pétersbourg en Russie. Ces travaux ont été poursuivis à l'institut de manière intensive. Les rendements des modules ont été améliorés grâce à une augmentation du rendement des cellules ainsi que grâce à l'introduction de meilleures lentilles et à un deuxième niveau de concentration optique. Récemment, nous avons mesuré un rendement de 28,5% pour le module, un record mondial. La figure 3 montre une photo du module FLATCON® et la courbe caractéristique mesurée.



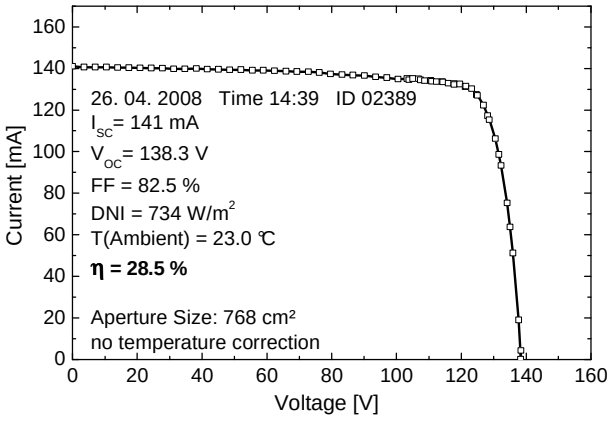


Figure 3 : Photo d'un module à concentration FLATCON®, composés de cellules solaires triples et qui intègre un deuxième niveau de concentration juste au-dessus de la cellule. Ce module atteint un rendement de 28.5%.

Les concentrateurs optiques comme par exemple les lentilles et les miroirs paraboliques ne peuvent focaliser que la lumière directe. C'est pourquoi les modules à concentration sont orientés vers le soleil : ils sont montés sur des supports en aluminium ou en acier, appelés « tracker », qui sont mis en mouvement avec précision par des moteurs électriques.

La technologie à concentration se prête particulièrement bien aux centrales électriques. D'une part, le grande taille des installations permet une forte réduction des coûts, d'autre part le système bénéficie de la surveillance et de la maintenance régulières dont toute centrale fait l'objet. Même à nos latitudes, nous recevons suffisamment de lumière directe pour de telles applications. Ces dernières sont encore plus avantageuses dans les régions du pourtour méditerranéen où le rayonnement est 50% plus élevé et les surfaces disponibles plus importantes.

Quels sont les avantages des centrales PV à concentration à base de matériaux III-V ? Elles nécessitent tout d'abord peu de matériaux semi-conducteurs relativement chers : 300kg pour 20MW de modules à concentration. La fabrication des systèmes requiert quant à elle environ 3.500 tonnes d'acier et 2.500 tonnes de verre. Dans le domaine du photovoltaïque, ce sont les cellules solaires qui coûtent le plus cher. Compte tenu de la quantité peu importante de matériau semi-conducteur impliquée dans leur fabrication, la technologie à concentration présente donc un clair avantage du point de vue économique.

De plus, il ne faut que peu de temps au système pour produire l'énergie qu'il a fallu dépenser pour sa fabrication. Autrement dit, cette technologie présente un faible temps de retour énergétique, 12 mois seulement pour les modules FLATCON® dans le sud de l'Europe. Pour la plupart des autres options technologiques, ce temps de retour est plus long.

En raison des avantages pré-cités, plusieurs entreprises se lancent dans la réalisation de projets PV à concentration à l'échelle commerciale. Concentrix Solar, une start-up de l'Institut ISE a utilisé et industrialisé la technologie que nous avons développée. Récemment, la première centrale de 100kW a été construite en Espagne (figure 4). Concentrix a annoncé qu'elle mettrait en service une centrale de 25MW avant fin 2008, permettant ainsi à la technologie PV à concentration de franchir l'étape de la commercialisation.

Selon moi, les systèmes PV à haute concentration représentent une solution importante pour un futur approvisionnement en énergie qui soit à la fois respectueux du climat et économiquement viable. Ils résultent d'une combinaison de petites puces semi-conductrices de haute technologie avec un système optique et mécanique peu coûteux et de grande précision. Cette combinaison rend envisageable une poursuite de la réduction des coûts.

Contact

Andreas Bett
Fraunhofer ISE, Freiburg
http://www.III-V.de

Téléphone : +49 (0) 761 45885257
Email : andreas.bett@ise.fraunhofer.de

Les applications de la technologie laser dans le photovoltaïque : une combinaison efficace porteuse de nouveaux concepts

Dr. rer. nat. Nils-Peter Harder, Leiter Siliziumwafer-Solarzellenentwicklung am ISFH GmbH

Nils-Peter Harder, né en 1971, a effectué des études de Physique à l'Université de Cologne, à la University of Britisch Columbia de Vancouver (Canada) et à l'Université de Leipzig. Il a été diplômé en 1997 à l'Université de Leipzig suite à ses travaux menés au centre de recherche de Jülich. M. Harder a effectué son doctorat entre 1999 et 2002 à la "University of New South Wales" de Sydney (Australie) sur les cellules solaires en couches minces de silicium cristallin et la modélisation de concepts de "Third-Generation" pour l'exploitation hautement efficace de l'énergie solaire. De 2003 à 2005, Dr. Harder a travaillé au sein de l'entreprise Saint-Gobain en tant qu'ingénieur et directeur de projet pour le développement de verres spéciaux pour applications photovoltaïques. En 2005, il a quitté Saint-Gobain pour l'Institut de recherche sur l'énergie solaire (ISFH) de Hameln, dont il dirige depuis 2007 le département "développement de cellules solaires à base de tranches de silicium".

Pour produire une électricité solaire moins chère, les principaux défis à relever sont l'augmentation du rendement des cellules solaires et la réduction de leurs coûts de fabrication. Outre les concepts novateurs de cellules, cela nécessite aussi des procédés d'usinage innovants. Le développement rapide de la technologie laser ouvre de nouvelles perspectives dans les domaines les plus divers, et se trouve souvent à l'origine de nouvelles innovations. En particulier dans l'industrie du photovoltaïque (PV), les possibilités d'application de la technologie laser sont nombreuses, que ce soit pour de nouveaux procédés de fabrication ou pour la réalisation de nouveaux concepts de cellules solaires.

Le PV et le laser : une combinaison efficace

Dans la production PV, le traitement laser des cellules et modules jouent déjà aujourd'hui un rôle important. Utilisée notamment pour la découpe du silicium, l'écriture, le marquage et l'isolation des bords (figure 1a), ainsi que la texturation des modules en couche mince, l'ablation laser a depuis longtemps fait ses preuves. Pour l'interconnexion et la texturation des couches minces, le laser peut creuser des lignes soit directement sur la face arrière du substrat, soit à travers lui (figure 1b).

Le premier concept de cellule solaire à haute efficacité, la cellule solaire « Buried-Contact » développée par l'Université UNSW de Sydney (University of New South Wales, Australie), a été commercialisée par BP Solar sous le nom de « Cellule Saturne ». Le concept consiste dans un premier temps à creuser des sillons sur la face avant de la cellule solaire (texturation de surface), par ablation laser puis par gra-

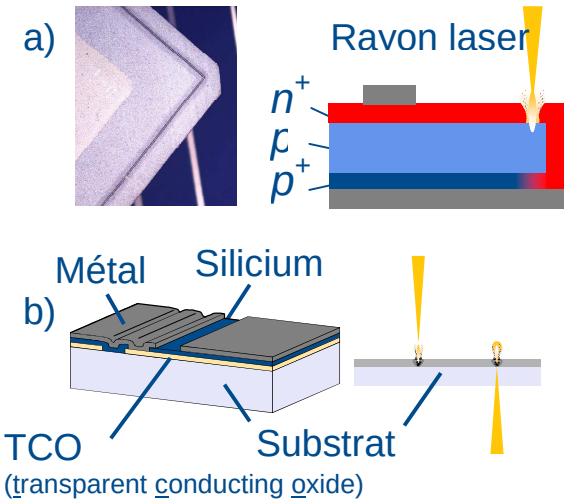


Figure 1: a) Isolation des bords
b) Texturation des modules en couches minces

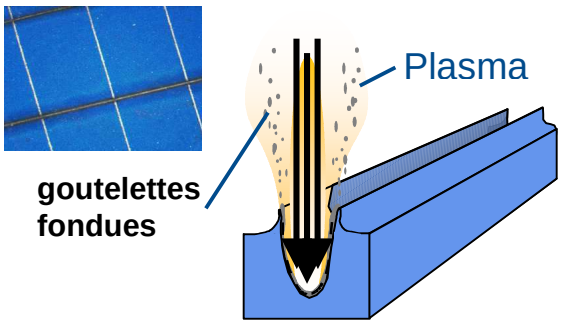


Figure 2 : Texturation du silicium dans le cas des cellules "Buried-contact"

vure plasma, puis à couler dans ces sillons un matériau conducteur (métallisation par galvanisation) (figure 2). Le fait que les sillons soient à la fois très fins et très profonds permet d'augmenter la surface éclairée (donc réduire les pertes d'ombrage) tout en limitant la résistance électrique des pistes conductrices.

Réalisation de nouveaux concepts de cellules et de modules

La technologie "Laser fired Contact"

Un des principaux problèmes à résoudre lors du développement d'une nouvelle cellule est celui de la réalisation des contacts du semi-conducteur. Il faut faire en sorte que la métallisation de la face avant (cavités conductrices) induise une faible résistance électrique et que celle de la face arrière minimise l'interface semi-conducteur/métal pour limiter les pertes de porteurs de charge photogénérés. La voie traditionnelle qui consiste à métalliser par sérigraphie toute la surface de la face arrière (fig. 2) n'est pas idéale car elle affecte le rendement. De plus, une surface de contact plus petite suffit à obtenir une conductivité électrique satisfaisante. L'Institut ISE a développé une solution élégante pour minimiser l'interface métal/semi-conducteur : en réalisant des contacts localement grâce à une technique laser. La technologie, dite « LFC » (Laser Fired Contact), permet d'insérer du métal localement à travers une couche isolante (voir fig. 3).

La couche diélectrique comprise entre les contacts constitue une bonne passivation de ces espaces intermédiaires tout en assurant une bonne réflectivité de la face arrière. Cette propriété est importante : la face arrière renvoie la partie de la lumière qui n'a pas été absorbée lors de son premier passage à travers la cellule, contribuant ainsi à améliorer l'absorption lumineuse.

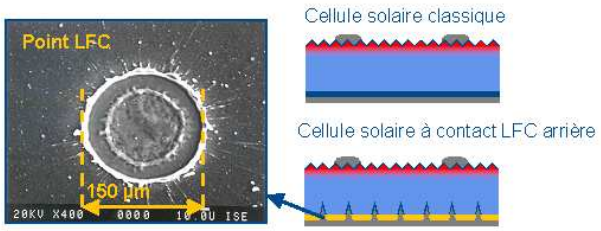


Figure 3 : Contacts LFC

Perçage laser et texturation superficielle

Pour des raisons esthétiques et pour améliorer l'absorption de la lumière incidente par le silicium, il serait avantageux de n'avoir aucun contact métallique sur la face avant de la cellule solaire. Pour optimiser la collecte des électrons au sein de la cellule, il demeure néanmoins sensé de placer l'émetteur sur la face avant. En perçant des trous fins à travers la cellule, il est possible de relier électriquement l'émetteur de la face avant aux contacts de la face arrière à travers des canaux de connexion eux aussi émetteurs. Le laser se prête bien au perçage de trous à travers les tranches de silicium. Les lasers à disque peuvent percer jusqu'à 3.000 trous par seconde à travers le silicium, rendant ainsi possible la création rapide des canaux de connexion. L'efficacité du perçage est liée aux caractéristiques du rayonnement infrarouge du laser à disque (énergie d'impulsion élevée et longue durée d'impulsion, environ 1 µs). En réalisant une texturation superficielle de la face arrière, on peut, qui plus est, faire en sorte qu'une grande partie de celle-ci devienne une jonction P-N, collectrice d'électricité. L'examen poussé des dommages du cristal causés par le laser a montré que les lasers les plus appropriés pour la texturation superficielle sont ceux qui émettent dans le vert. Un avantage de cette texturation superficielle est que l'usinage laser du matériau élimine en même temps les couches d'oxydes présentes sur le silicium. Lors de l'établissement de la jonction P-N au cours des étapes suivantes, ces couches d'oxydes peuvent servir de barrière de diffusion même dans les zones non-traitées par laser.

La structure ainsi obtenue, dite EWT (« Emitter-Wrap-Through »), est illustrée sur la figure 4. Cette structure sert de base à la cellule solaire RISE-EWT, développée par l'Institut ISFH. Elle permet une collecte efficace des électrons, même avec une qualité de silicium relativement faible. Une telle cellule est non seulement esthétique du fait de l'aspect homogène de sa face avant (voir fig. 5), mais elle peut atteindre qui plus est des rendements de conversion très élevés (supérieurs à 21%), si on utilise du silicium de haute qualité.

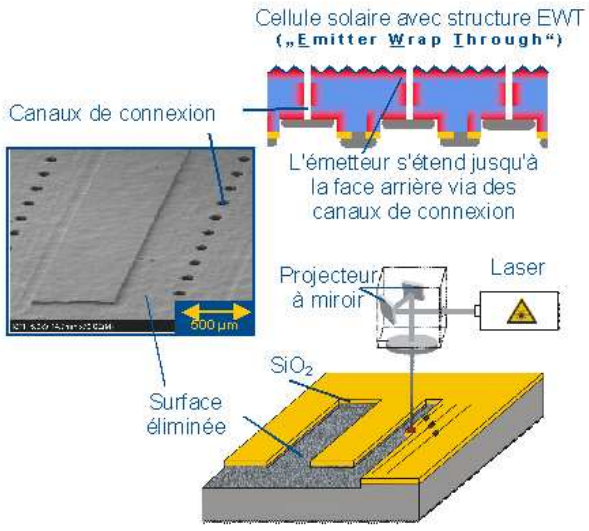


Figure 4 : Canaux de connexion et texturation superficielle des cellules solaires EWT

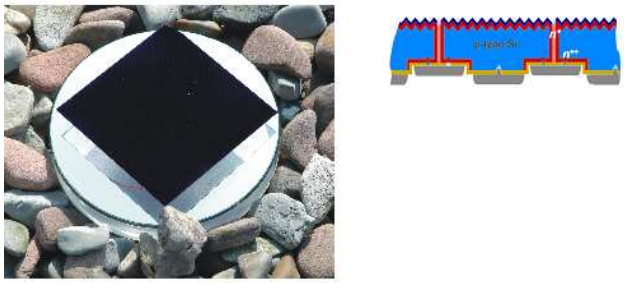


Figure 5 : Face avant de la cellule et schéma d'une coupe transversale de la cellule RISE-EWT développée à l'ISFH

Dopage laser

Le dopage laser représente une alternative au dopage local ou à la fabrication d'émetteur sélectif à l'aide de barrière de diffusion. Une couche, par exemple un film liquide contenant du phosphore, est déposée sur la tranche de silicium et la substance dopante est introduite dans le silicium par impulsions laser. Pour assurer une pénétration profonde des atomes dopants, une solution consiste à faire fondre superficiellement le silicium qui, en se solidifiant, reprend la structure cristalline du substrat tout en y intégrant les atomes dopants. Grâce au laser, des zones dopées de structure quelconque peuvent être créées dans la surface de la tranche sans nécessiter de recours aux méthodes complexes de masquage et de gravure.

Ablation de couches isolantes sur le silicium

Chez les cellules solaires à haute efficacité, la surface externe de la tranche de silicium est responsable en grande partie des pertes liées à la recombinaison des porteurs de charge photogénérés : afin de minimiser ces pertes, différentes techniques de passivation des surfaces ont été développées. Les surfaces de silicium oxydé et celles recouvertes de nitrure de silicium possèdent des propriétés passivantes particulièrement bonnes. Dans les deux cas, le silicium est caché sous une couche isolante qui doit être localement éliminée pour l'application des contacts. Bien que la photolithographie donne de très bons résultats en laboratoire, ses coûts élevés rendent rédhibitoire son application industrielle pour la fabrication d'un produit de masse tel que les cellules solaires. Dans ce contexte, l'utilisation des « lasers à impulsions ultra-courtes» (ordre du billionième de seconde) s'est avérée très fructueuse ces derniers temps. La concentration de la puissance laser sur une durée très courte peut provoquer des effets non linéaires qui font que les isolants transparents deviennent capables d'absorber. L'utilisation des lasers à impulsion ultra courtes dans le but d'éliminer les couches d'oxydes de silicium et de nitrure de silicium ne s'avère une technique rentable et non dommageable que si la durée de l'impulsion est assez courte pour ne pas que le substrat s'échauffe et conduise la chaleur en profondeur. L'effet du laser, dont l'apport d'énergie permet l'élimination locale de l'isolant, se limite aux couches superficielles, sans endommager profondément le silicium. Aussi le traitement laser se prête-t-il particulièrement bien à la création locale des contacts (fig. 6) pour les cellules solaires à haut rendement. En utilisant le laser à impulsions ultra-courtes pour l'ablation locale des isolants passivants tel que l'oxyde de silicium et le nitrure de silicium, il a été possible de fabriquer des cellules à haut rendement (supérieurs à 21%) sans endommager significativement les émetteurs se trouvant en dessous.

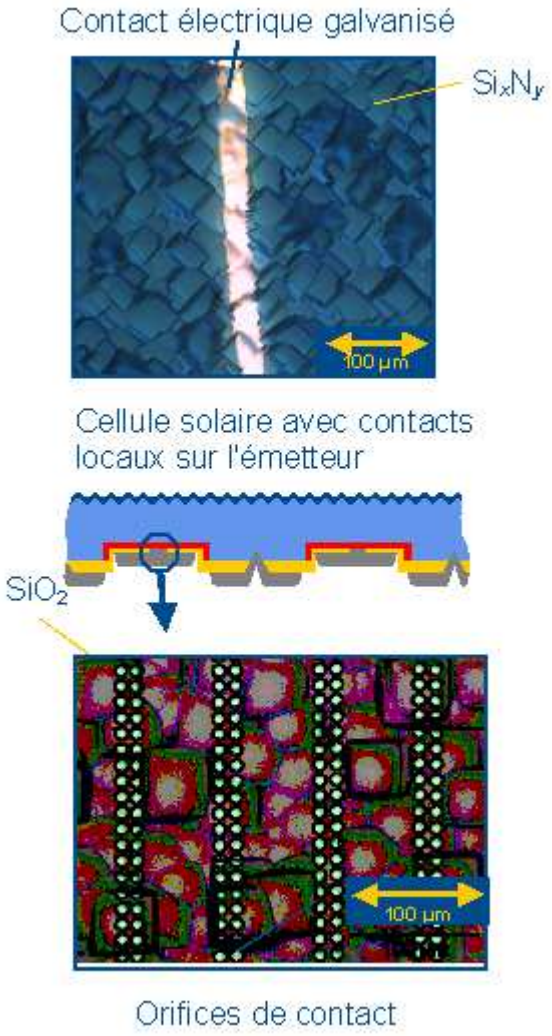


Figure 6 : Réalisation d'orifices de contacts par élimination locale de nitrure de silicium et d'oxyde de silicium grâce à un laser à impulsions ultra-courtes

Développement de cellules grâce à des techniques laser

En coopération avec les instituts de recherche ISE et ISFH, l'entreprise Q-Cells AG a développé, grâce à des techniques laser, une cellule solaire caractérisée par un rendement de plus de 20% en vue d'une production industrielle. "Quebec", le nom de ce projet, dérive de la fusion onomatopéique de la 1ère syllabe de Q-Cells AG avec le son "back" de "back-contacted". La fabrication industrielle des cellules Quebec débutera sur une ligne d'essai en cours de construction.

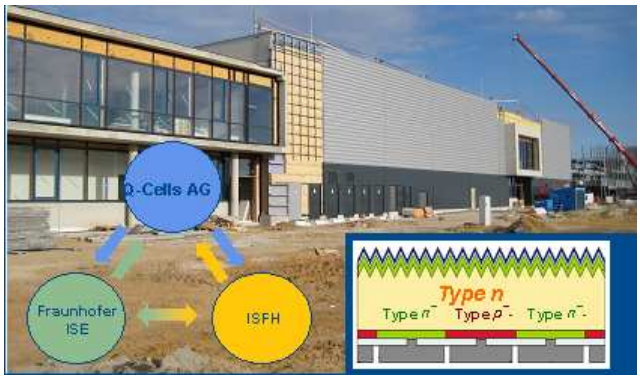


Figure 7 : Configuration du projet Quebec - schéma de la cellule et photo de la construction de la ligne d'essai pour une application industrielle chez Q-Cells AG.

Soudage laser sur film laminé : méthode d'interconnexion des cellules sans contact physique

La technologie laser n'est pas seulement à l'origine de nouveaux concepts de cellules, mais aussi de concepts d'assemblage de ces cellules en modules. La fig. 8 illustre le déroulement du procédé de "soudage laser sur film laminé" qui a été développé à l'Institut ISFH. Pour le montage des cellules en "string" (connexion en série), le nouveau procédé présente l'avantage d'éviter certaines étapes manipulatoires délicates du procédé conventionnel puisqu'il autorise un soudage des cellules directement à leur emplacement, c'est-à-dire sur le film laminé du module.

Ce procédé d'interconnexion des cellules doit être contrôler précisément, afin de réduire au minimum l'apport thermique du laser pour éviter d'endommager le film laminé (Laminierfolie), sensible à la chaleur.

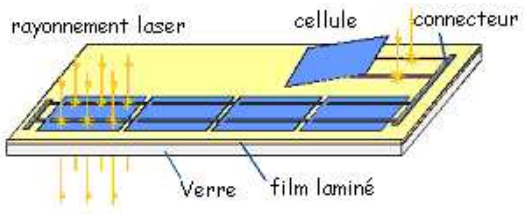


Figure 8 : Soudage laser sur feuille laminée – cette méthode innovante permet d'éviter certaines étapes complexes du processus classique dans la mise en série de cellules solaires (en "string").

Conclusion

Les futures installations de fabrication de cellules PV devront relever des défis ambitieux. L'objectif peut se chiffrer à "une cellule par seconde" via une mise en oeuvre industrielle des procédés laser. Aussi, tous les nouveaux procédés reposant sur un traitement laser de petites surfaces ont de fortes chances de s'imposer dans un avenir proche. Parallèlement apparaissent sans cesse de nouvelles sources de rayonnements laser caractérisées par des durées d'impulsion de plus en plus courtes et des puissances de plus en plus élevées. De plus, les possibilités se multiplient dans le domaine de la formation et de l'orientation (guide) des faisceaux laser, ce qui devrait rendre possible la texturation de grandes surfaces de cellules solaires à des coûts relativement bas, en vue d'une production à l'échelle industrielle.

Les technologies laser représentent une aide précieuse au photovoltaïque. Il suffit de considérer la liste impressionnante de ses domaines d'applications possibles pour s'en rendre compte : elles représentent une alternative technologique à la photolitographie qui est applicable industriellement, autorisent le perçage en quelques secondes de dizaines de milliers de trous à travers une tranche de silicium, permettent le dopage local du silicium, la réalisation de soudages qui limitent l'apport thermique, et sont à l'origine du développement de nouveaux concepts de cellules.

Les travaux qui ont permis les résultats présentés dans cet article ont été menés grâce au soutien public à la recherche.

Contact

Dr. Nils-Peter Harder
Institut für Solarenergieforschung Hameln/Emmerthal GmbH (ISFH)
Am Ohrberg 1, D-31860 Emmerthal, Deutschland

Téléphone +49 (0) 5151 999-426
Email harder@isfh.de
http://www.isfh.de/

Le photovoltaïque organique – Des films minces pour une électricité solaire abordable

Dr Karl Hensen, BASF Future Business GmbH

BASF est le premier groupe chimique au monde : The Chemical Company. Leur activité s'étend du pétrole et du gaz aux pesticides et produits chimiques nobles en passant par les matières plastiques, les produits chimiques et les agents d'ennoblissement. BASF s'affirme comme un partenaire fiable pour tous ses clients en les accompagnant sur la voie du succès.

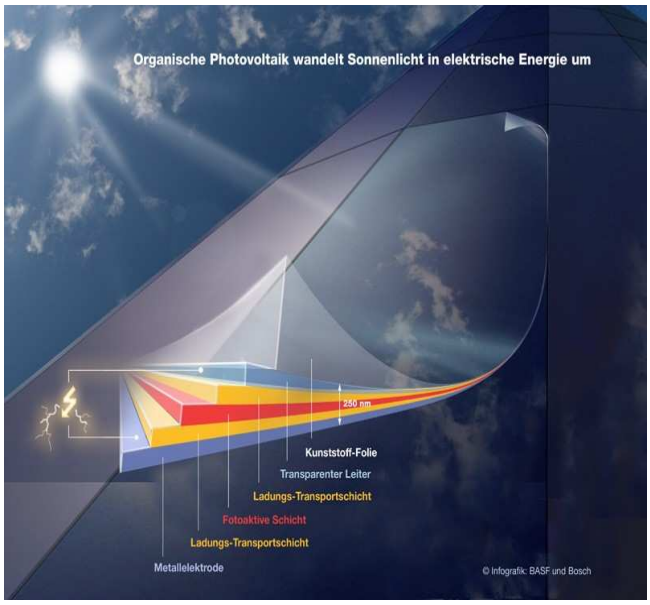
Avec des produits de haute qualité et des solutions intelligentes, BASF contribue à relever des défis globaux tels que la protection climatique, l'efficacité énergétique, l'alimentation et la mobilité.
En 2007, BASF employait 95.000 personnes dans le monde, pour un chiffre d'affaires de presque 58 milliards d'euros. Plus d'informations sur BASF sont disponibles sous : www.basf.de.

Sous le terme de photovoltaïque (PV), on entend la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Le nom est une combinaison de *Photos* (lumière en grec) et *Volta* (du nom du pionnier de l'électrotechnique Alessandro Volta). Les cellules PV à base de silicium (Si) dominent le marché. Contrairement à ce type de cellules, inorganiques, les cellules organiques sont constituées de semi-conducteurs organiques.

La recherche dans le domaine du PV organique existe depuis les années 1960. En 1986, un groupe de chercheurs de l'entreprise Kodak a franchi une étape importante en développant la première cellule solaire en polymère. Depuis les années 1990, d'intenses travaux de R&D sont menés de par le monde dans le domaine des matériaux organiques et de leurs utilisations dans différents concepts de cellules PV organiques. La phase de commercialisation, sans compter les applications de niche, est attendue pour 2015. Le rendement pose comme toujours problèmes aux chercheurs : aujourd'hui, seuls 5 % du rayonnement solaire sont effectivement convertis en électricité. L'objectif est d'atteindre 10 %. Quant à la durabilité des cellules, elle devrait s'élever à au moins 20 ans.

Les matériaux organiques présentent des avantages par rapport aux semi-conducteurs inorganiques, notamment du point de vue du génie des procédés. Contrairement au cas du silicium, le traitement de ces matériaux nécessite un faible apport en énergie et s'avère donc moins coûteux. Etant donnée leur forte capacité d'absorption de la lumière, il est possible de les imprimer ou les déposer par vaporisation sous forme de couches nanométriques. Aujourd'hui, les modules PV à base de silicium coûtent environ 3 euros par Watt crête (3€/Wc). Le Watt crête est l'unité utilisée pour caractériser la puissance nominale des cellules PV. Grâce aux nouvelles techniques, le coût des modulent devraient passer largement en-dessous du seuil de 1€/Wc dans des conditions similaires.

La cellule organique est composée de différentes couches qui peuvent être déposées par exemple sur une plaque de verre ou un film. Les couches minces de 100nm à 5µm autorisent une bien plus grande flexibilité d'utilisation.



Pour BASF, la thématique du PV organique constitue une des priorités stratégiques dans les domaines du management énergétique et des nanotechnologies, qui gagnent de plus en plus en importance.
Leader mondial, le groupe chimique apporte son large savoir-faire dans le domaine de la synthèse de colorants, de la physique du solide et de la modélisation en chimie quantique. En coopération avec ses partenaires, BASF étudie les matériaux photoactifs à la base des cellules PV organiques, matériaux qui déterminent des propriétés importantes du produit final. En 2006, BASF et ses partenaires industriels et universitaires ont créé à Ludwigshafen une plateforme spéciale de coopération sous la forme d'un « Joint Innovation Lab » d'électronique organique.

Réfrigérer les aliments à l'aide du soleil ou se balader avec une prise portable dans la poche…

Image : Konarka Technologies Inc.

Jusqu'à présent, l'électricité solaire est surtout produite sur nos toits. Mais cela va changer : à l'avenir, les façades des tours d'habitation, les toits des voitures et même les fenêtres seront largement recouvertes par des panneaux solaires. Nous allons utiliser l'électricité solaire là où nous en avons besoin : pour faire fonctionner l'éclairage et la climatisation dans les grands bureaux ou encore le réfrigérateur de la maison. Une nouvelle génération technologique PV rend cela possible – une sorte de film solaire.
Non seulement elle est plus souple, mais elle est également nettement meilleur marché que la technologie PV classique à base de silicium, matière première rigide et chère. Un tel film s'obtient de manière similaire aux DELO (« diodes électroluminescentes organiques ») : plusieurs couches fines d'un matériau semi-conducteur capable d'absorber la lumière sont déposées sur une matière plastique souple. De cette manière, on obtient un sandwich de cellules solaires de seulement quelques nanomètres d'épaisseur et aussi souples que les films d'emballage utilisés pour la conservation des aliments.
Mais ces films solaires ne sont pas seulement adaptés à une utilisation sur des surfaces étendues, elles peuvent également s'avérer utiles à quiconque se trouve en déplacement. Ainsi, il nous sera peut-être possible, d'ici un an, de dérouler un film plastique et de l'étendre au soleil pour recharger de cette manière la batterie de nos appareils portables. Ou même de porter une veste entièrement recouverte de cellules solaires convertissant la lumière en électricité pour charger la batterie du téléphone portable se trouvant dans la poche.

De la taille d'une main, quatre cellules solaires branchées en série délivrent une tension pouvant aller jusqu'à 2 Volts. Les cellules solaires sont fabriquées avec des colorants spéciaux pour permettre une variabilité des nuances et de la transparence. Les cellules PV organiques peuvent de ce fait être adaptées à la couleur des toits des voitures et des façades des maisons.

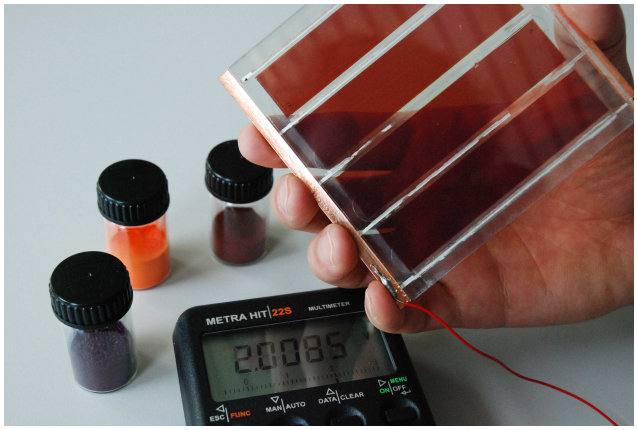
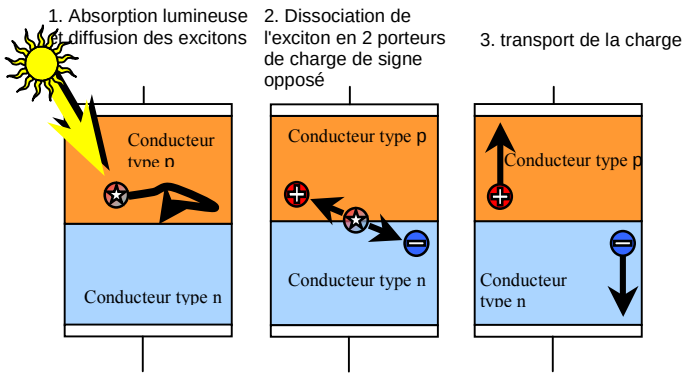


Image : BASF SE

Fonctionnement d'une cellule solaire et rôle du BASF

La transformation directe de l'énergie solaire en électricité grâce à des matériaux organiques se produit selon le schéma suivant :



Toutes les étapes décrites sur ce schéma peuvent être réalisées avec des matériaux organiques. Pour ce faire, elles doivent être parfaitement coordonnées pour pouvoir élaborer une cellule solaire organique efficace et durable. Les matériaux sont la clef du PV organique, or BASF a une expertise dans la synthèse de semi-conducteurs et de colorants organiques.

Il existe deux types différents de cellules solaires organiques. Elles se distinguent l'une de l'autre par les matériaux utilisés, leur structure ainsi que la manière dont elles sont produites. La recherche de BASF se focalise sur la synthèse sur mesure de matériaux organiques pour deux types de cellules : le type DSSC (Dye sensitized Solar Cells) et le type HJSC (Organic Hetero-Junction Solar Cells).

Les cellules à hétérojonction HJSC combinent un semi-conducteur de type n et un semi-conducteur de type p. Les deux matériaux interviennent dans le processus d'absorption lumineuse. Les couches minces de ces matériaux organiques sont appliquées soit par dépôt sous vide soit par impression. Les rendements (part de l'énergie lumineuse effectivement convertie en électricité) atteints avec ce type de cellules se situent entre 5% et 7%.

Dans le cas des cellules de type DSSC, l'absorption lumineuse et le transport de charges ont lieu séparément. Une couche mince de colorants absorbants est déposée sur une couche mésoporeuse conductrice en TiO_2. Pour le déplacement des trous, on utilise des semi-conducteurs de type p ou électrolytes organiques (fluides ou solides). Les rendements maximums atteints avec ce type de cellule sont de 11% (avec un électrolyte fluide) et 5% (avec un électrolyte solide).

Pour qu'une cellule solaire soit efficace et durable, les matériaux organiques doivent être intégrés dans une architecture nanostructurée des composants. Cela suppose une forte complémentarité entre les domaines du design des matériaux et du développement technique. Pour favoriser l'innovation à l'interface entre matériaux et composants, BASF apporte ainsi ses compétences dans le premier domaine et ses partenaires industriels leur savoir-faire technologique dans le second. Ces compétences sont complétées par l'expertise et la recherche de leurs partenaires universitaires. Le „Joint Innovation Lab" (JIL) du BASF, créé en septembre 2006 à Ludwigshafen, sert de plate-forme de coopération pour ses partenaires industriels et universitaires. Au JIL, des experts de différentes disciplines travaillent par ailleurs sur les DEL organiques, technologie qui repose également sur les matériaux organiques semiconducteurs.

L'objectif de la recherche sur le photovoltaïque organique est de développer des cellules solaires organiques qui convertissent au moins 10% de la lumière en électricité et qui présentent une durabilité supérieure à 20 ans.

Contact

Dr Karl Hensen
BASF Future Business GmbH

Téléphone : +49 (0) 621 60 76309
Email : karl.hensen@basf.com

L'électricité photovoltaïque, porteuse d'avenir : son rôle dans l'approvisionnement énergétique du futur

Milan Nitzschke, Directeur Marketing, Communication et développement durable de l'entreprise, SolarWorld AG

Le groupe SolarWorld AG (ISIN: DE0005108401) est un des plus grands fournisseurs au monde de technologies photovoltaïques de haute qualité. SolarWorld AG emploie 2.095 personnes dans le monde. L'entreprise est active à tous les niveaux de la filière solaire : du traitement de la matière première (silicium) jusqu'à la livraison d'installations PV clef en main. SolarWorld AG est présent à l'international sur tous les marchés PV de croissance. Elle possède des antennes en Allemagne, en Espagne, aux Etats-Unis, en Afrique du sud et à Singapour. En Corée du sud, SolarWorld AG construit actuellement une unité de fabrication de modules PV, pour satisfaire à l'avenir la demande asiatique croissante sur place. Sous le nom de Solar2World, le groupe signifie son engagement éthique via des projets PV dans les pays en voie de développement.

La Terre reçoit du soleil une énergie équivalente à 10.000 fois ses besoins. Ainsi, l'énergie solaire est pratiquement disponible de manière illimitée, dans le temps, dans l'espace, et en quantité. L'énergie solaire représente pour le monde industrialisé la solution aux problèmes de la gestion des ressources et du dérèglement climatique. Dans de nombreuses régions (comme par exemple 90% de l'Afrique), la production d'électricité solaire représente l'unique option pour garantir un approvisionnement électrique de base et un développement économique. A long terme, il n'est pas possible d'envisager un mixe énergétique mondial viable sans une large contribution de l'énergie solaire. Les points forts du photovoltaïque sont notamment que :

- L'électricité solaire est produite durant la journée, c'est-à-dire quand la demande électrique et les coûts de production d'électricité conventionnelle sont au plus haut.
- Les panneaux photovoltaïques (PV) produisent l'électricité là où celle-ci est consommée. Cela permet de minimiser les coûts de transport/distribution et de délester le réseau électrique.
- A long terme, les coûts du photovoltaïque dépendront exclusivement de la technologie et non des ressources.

Les dix dernières années, le photovoltaïque est passé du stade de technologie de niche à un secteur qui, au sein de l'industrie de l'énergie, est caractérisé par un des plus forts potentiels de croissance. La croissance la plus rapide a été observée en Allemagne. Entre temps, tous les pays industrialisés les plus importants connaissent un très fort développement dans ce secteur. Le succès en Allemagne repose sur la loi de promotion des énergies renouvelables électriques (EEG), qui assure aux exploitants privés une sécurité d'investissements maximale et qui accompagne la réduction des coûts de production de l'électricité solaire. Entre 2000 et fin 2007, la puissance PV installée en Allemagne est passée de 100MW à environ 4.000MW. La production d'électricité solaire respectueuse du climat s'élève à plus de 4 milliards de kWh par an, soit l'équivalent de la consommation de plus d'un million de foyers. Le concept de soutien allemand a été repris par plus de 40 pays de part le monde.

Changement socio-économique

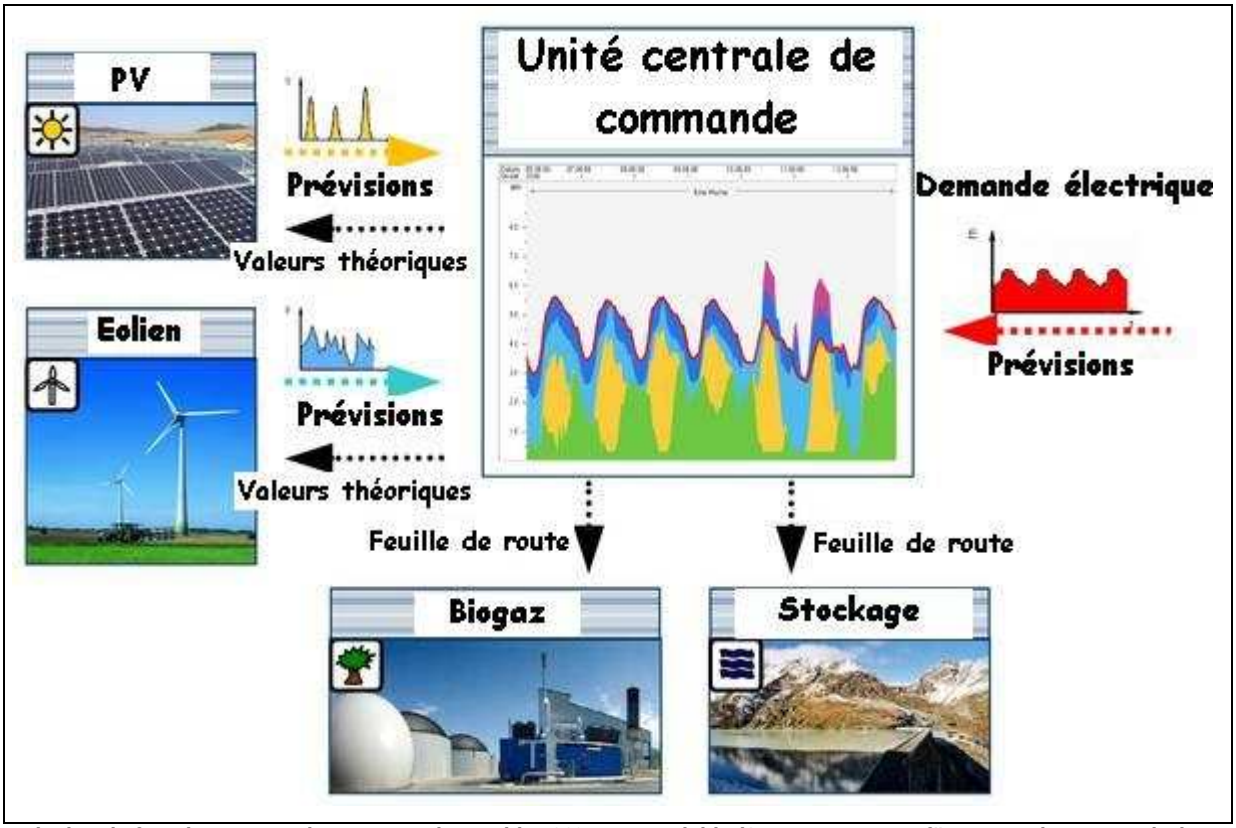
Malgré une forte croissance du PV par le passé, le plus gros de son développement reste encore à venir. En Allemagne, pays de l'Union européenne caractérisé par la plus forte intensité énergétique, le PV devrait couvrir environ 10% de la consommation brute d'électricité d'ici 2020, ce qui correspond à la consommation totale des foyers allemands. Dans les pays européens dont l'intensité énergétique est plus basse, la part du PV dans la consommation pourrait même atteindre 30% et plus. Pour réaliser cet énorme potentiel, des sauts d'efficacité sont nécessaires, dans la technologie et dans la fabrication, qui permettent de réduire continuellement les coûts par Watt de crête. Par exemple, la construction de grosses

usines de fabrication entièrement automatisées conduit à une réduction des coûts unitaires. Grâce à la recherche et au développement, les processus tout au long de la chaîne de production sont optimisés, et les produits intermédiaires et finaux plus performants. Les coûts de production d'électricité solaire s'en trouvent ainsi constamment réduits, ce qui est justement le but du mécanisme politique de soutien. La loi EEG prévoit une baisse annuelle de 8% à 10% du taux de rémunération dont bénéficient les installations nouvellement installées. En 2015, les coûts de production d'électricité solaire seront inférieurs au prix de l'électricité conventionnelle payé par le particulier. Dans les régions fortement ensoleillées comme le sud des Etats-Unis, ce moment arrivera beaucoup plus tôt encore. A partir de là, les consommateurs propriétaires d'une installation solaire ou qui envisagent d'en installer une pourront se contenter d'acheter moins d'électricité auprès des fournisseurs d'électricité auprès des fournisseurs externes ou même de ne plus en acheter du tout. Cette situation de concurrence rendra le photovoltaïque plus compétitif ce qui stimulera la croissance du secteur. En atteignant la „parité avec le réseau" , l'électricité solaire devient non seulement compétitive vis-à-vis de l'électricité conventionnelle, mais constitue qui plus est une alternative respectueuse du climat. Du point de vue socio-économique, les particuliers qui équipent le toit de leur maison de panneaux PV se trouvent dans une situation gagnant-gagnant. L'électricité auto-produite n'est pas seulement meilleur marché, elle a également une plus grande valeur écologique. En surmontant les obstacles économiques, les installations PV ont de fortes chances de s'imposer comme des produits de consommation de haute qualité auprès de particuliers de plus en plus rationnels.

Modification des structures d'approvisionnement énergétique

La croissance du secteur PV va également modifier le système énergétique. Les énergies renouvelables telles que le photovoltaïque constituent des sources décentralisées qui, à mesure qu'elles se développeront, modifieront les structures de consommation d'un côté, et les structures de production électrique supra-régionale de l'autre. En atteignant la situation de „parité avec le réseau", de plus en plus de particuliers vont renoncer à l'approvisionnement centralisé en électricité. Cela aura notamment des répercussions au plus petit niveau du réseau électrique national, puisque ces particuliers, anciens clients des fournisseurs électriques, sont raccordés au réseau via des lignes à basse tension. Par ailleurs, même si la quantité d'électricité à produire par les grosses centrales s'en trouvera réduite, les lignes haute et moyenne tension resteront malgré tout nécessaires pour alimenter les petits réseaux de distribution.

De plus, une production décentralisée nécessite un système d'approvisionnement électrique global. Imaginons un système où l'on combine différentes formes d'énergies renouvelables : des sources soumises aux aléas météorologiques (comme l'énergie solaire, l'éolien) avec des sources mobilisables de manière flexible (comme la biomasse, le biogaz, la géothermie et l'hydraulique) ; en Allemagne, des unités de stockage sont déjà disponibles aujourd'hui en nombre suffisant sous la forme de centrales hydroélectriques à pompe. Grâce à une gestion centralisée de l'ensemble décentralisé d'unités de production d'énergie d'origine renouvelable, il est possible de faire coïncider précisément l'offre et la demande. Le rôle des installations PV consiste ici de couvrir les pics de demande. En effet, étant donné le prix particulièrement élevé de l'électricité de pointe, l'énergie solaire peut apporter une précieuse contribution à cette combinaison d'énergies renouvelables. Depuis 2006, des tests sont menés pour prouver la capacité d'un système de 36 centrales renouvelables à couvrir 100% des besoins électriques à partir d'énergies renouvelables (www.kombikraftwerk.de). Les véhicules électriques pourront à l'avenir être utilisés à des fins de stockage : l'accumulateur servant au stockage de l'électricité d'origine renouvelable se trouvera au garage. Entre temps, tous les grands constructeurs automobiles travaillent au développement de véhicules à propulsion électrique. Le rôle des technologies hydrogène reste encore mineur. Les biocarburants n'auront qu'une fonction de transition technologique.



Principe de fonctionnement d'une "centrale combi" 100% renouvelable (Source : *Agentur für Erneuerbare Energien*)

Conclusion

L'énergie solaire modifiera à moyen terme le système énergétique centralisé tel qu'on le connaît aujourd'hui. Les consommateurs deviendront des producteurs d'électricité et quitteront ainsi la communauté des consommateurs anonymes. Cela renforcera le décentralisme, l'auto-responsabilité, et par biais de conséquence, la démocratie et l'autodétermination. De plus, la mise en réseau des énergies renouvelables va se substituer au paysage énergétique actuel où dominent encore les grosses centrales thermiques.

Contacts

Milan Nitzschke
SolarWorld AG

Email milan.nitzschke@solarworld.de

Contact presse
SolarWorld AG, Bonn

Téléphone +49 (0) 228 55920-470
Email placement@solarworld.de

Centrales solaires thermiques à concentration : le soutien à la recherche du gouvernement fédéral

Joachim Nick-Leptin et Mareike Welke, Service en charge de la recherche et du développement dans le domaine des énergies renouvelables, Ministère fédéral de l'environnement (BMU), Berlin.

Les centrales solaires thermiques à concentration (ou centrales CSP) convertissent l'énergie solaire en électricité via un cycle thermique conventionnel. Les rayons du soleil sont concentrés à l'aide de miroirs. Les très hautes températures ainsi atteintes permettent de produire de la vapeur qui entraîne la turbine d'un générateur. Il existe différents types de centrales solaires thermiques à concentration. En fonction du système de miroirs utilisé, on distingue d'une part les centrales cylindro-paraboliques et les centrales à collecteurs de Fresnel (concentration linéaire) et d'autre part les centrales à tour et les paraboles Dish-Stirling (focalisation ponctuelle).

La protection du climat ne connaît pas de frontières

Les centrales solaires thermiques à concentration (ou centrales CSP – "concentrated solar power") nécessitent une grande part de rayonnement solaire direct. C'est pourquoi les meilleurs lieux d'implantation de cette technologie se trouvent dans la ceinture équatoriale, c.-à.-d. dans la zone la plus ensoleillée de la planète. C'est là que la production d'électricité solaire est la plus favorable. Les centrales solaires thermiques peuvent être combinées avec des centrales à gaz (centrales hybrides) ou des systèmes de stockage thermique, et ainsi produire de l'électricité en continu. Une autre possibilité est la cogénération qui consiste à valoriser énergétiquement la chaleur générée, autrement dit l'exploiter pour le dessalement de l'eau de mer par exemple ou la climatisation. Cette combinaison convient parfaitement aux zones désertiques.

Les entreprises et les instituts allemands ont une position de leader à l'échelle internationale dans le domaine du développement et de la commercialisation des technologies CSP. Le soutien à la recherche apporté par le ministère fédéral de l'environnement contribue au maintien et à la consolidation de cette avance technologique. A moyen terme, les centrales CSP doivent devenir compétitives avec les centrales thermiques conventionnelles dans les zones fortement ensoleillées et contribuer ainsi à la protection climatique au niveau mondial.

Les succès du soutien à la recherche

Le BMU finance actuellement surtout les technologies industrialisables développées pour les centrales cylindro-paraboliques et les centrales à tour. Il encourage d'une part le développement de composants clés tels que les collecteurs, les accumulateurs et les récepteurs et d'autre part l'optimisation et la démonstration de la faisabilité technique des systèmes complets. En 2007, 18 projets ont été sélectionnés par le BMU et bénéficieront d'un financement de près de 6 millions d'euros. Les premières centrales cylindro-paraboliques européennes Andasol I+II sont en construction Andasol I+II sont en construction en Espagne depuis l'été 2006. A l'avenir, elles doivent alimenter 400.000 personnes en électricité verte. Le projet d'Andasol aura recours à des technologies allemandes qui ont été développées avec le soutien du BMU. Une centrale à tour reposant sur une technologie innovante est en construction à Jülich depuis août 2007 à des fins de recherche et de tests. A partir de 2009, elle doit injecter 1,5 mégawatts de puissance électrique sur le réseau.

Perspectives

De plus en plus de pays reconnaissent les avantages et le potentiel des centrales solaires thermiques. Des centrales sont actuellement en phase de planification ou de construction dans le sud de l'Europe, en Afrique du nord, au Proche-Orient, en Australie et aux Etats-Unis. Parmi ces projets, nombreux sont ceux qui mobilisent une technologie développée avec le soutien du ministère fédéral de l'environnement. C'est pourquoi, dans les an-

nées à venir, le BMU continuera à soutenir énergiquement des activités de développement dans le domaine des centrales CSP.

Projet	Site		Technologie	Puissance	Mise en service
Arizona	Tucson	USA (Arizona)	cylindro-parabolique	1 MW	2006
Nevada Solar One	Boulder City	USA (Nevada)	cylindro-parabolique	64 MW	2007
ANDASOL I	La Calahorra (à proximité de Grenade)	Espagne	cylindro-parabolique	50 MW	2008
Solarturm Jülich	Jülich	Allemagne	Tour solaire	1,5 MW	2008
PS - 20	Sevilla	Espagne	Tour solaire	20 MW	2008
ANDASOL II	La Calahorra (à proximité de Grenade)	Espagne	cylindro-parabolique	50 MW	2009

Tableau 1 : Participations actuelles des entreprises allemandes à des projets de centrales CSP - Source : BMU

Des études financées par le BMU montrent les perspectives à moyen et à long terme de la production d'électricité solaire-thermique. Dans le cadre de ces études, la rentabilité du dessalement solaire de l'eau de mer a été examinée et les possibilités d'application des technologies CSP pour des faibles puissances ont été testées. Les aspects sociaux, politiques et économiques de la technologie ont également été abordés. Ainsi, elles ouvrent la voie vers de nouvelles applications.

Contacts

Joachim Nick-Leptin
BMU, Berlin

Téléphone +49 (0) 30 18 30 53 650
Email joachim.nick-leptin@bmu.bund.de

Mareike Welke
BMU, Berlin

Téléphone +49 (0) 30 18 30 53 653
Email mareike.welke@bmu.bund.de

Les priorités de la recherche appliquée sur les systèmes solaires thermodynamiques

Prof Dr – Ing. Robert Pitz-Paal, directeur de la recherche sur l'énergie solaire au Centre de recherche aérospatiale allemand (DLR)

Dr – Ing. Robert Pitz-Paal, né en 1963, a obtenu son diplôme de physique en 1988 à l'Université de Munich et a soutenu son doctorat en 1993 à l'Institut de thermodynamique et de mécanique des fluides de l'Université de Bochum. Depuis, il travaille au centre de recherche aérospatial allemand (DLR) sur les centrales solaires thermiques à concentration (CSP). Depuis 2002, il dirige le département de recherche solaire de l'Institut de thermodynamique technique à Cologne-Porz, ainsi que le programme « énergie solaire » du DLR. Parallèlement, il est, depuis 2003, professeur de technologies solaires à l'Université RWTH à Aix-la-Chapelle.

Objectifs et organisation de la recherche

En coopération avec des partenaires industriels, le Centre de recherche aérospatiale allemand (DLR) développe des systèmes solaires à concentration (ou systèmes CSP) pour la production de chaleur, d'électricité et de combustibles en vue d'un approvisionnement énergétique durable. Son domaine de compétence s'étend de la recherche fondamentale et de la conception théorique aux projets de démonstration en conditions réelles d'exploitation (y compris leur faisabilité économique), en passant par le développement de méthodes expérimentales et numériques. A la demande de ministères de tutelle et de l'industrie, 90 employés développent et testent des composants pour des systèmes CSP, réalisent des études de faisabilité technique et économique, et analysent des collecteurs et d'autres systèmes optiques et thermiques. Le DLR dirige également des grands projets internationaux. Outre la recherche expérimentale menée sur la „ Plataforma Solar de Almería“ (PSA) en Espagne, le DLR exploite un four solaire (25 kW), un diffuseur haute puissance (20 kW), ainsi que d'autres installations solaires à Cologne-Porz. Grâce à des laboratoires bien équipés, des ateliers et des outils de simulation installés à Stuttgart et à Cologne-Porz, le DLR est en mesure de mener des activités de R&D sur les systèmes et dans les domaines thermique, optique et chimique.

Le fait qu'un tiers de notre budget provienne de fonds tiers est un signe de la haute qualité de notre travail. En faisant participer étudiants, futurs diplômés et doctorants aux projets de recherche actuels, la recherche solaire contribue à la formation de la relève scientifique. Le DLR coopère étroitement avec l'établissement d'enseignement technique supérieur d'Aix-la-Chapelle (RWTH) via une chaire de professeur commune dédiée aux technologies solaires. De plus, un institut virtuel de recherche sur les centrales solaires à tour a été créé début 2008 en partenariat avec les instituts de la RWTH et de l'école supérieure spécialisée d'Aix-la-Chapelle (FH Aachen) ainsi qu'avec l'Université de Leuven. Nous travaillons aussi étroitement avec l'Université de Stuttgart dans les domaines de la formation et de la recherche.

A court terme, l'objectif du DLR consiste à mettre ses capacités de R&D à la disposition de l'industrie allemande afin de favoriser et de garantir l'introduction des technologies CSP sur le marché européen.

A moyen terme, la poursuite du développement de ces technologies doit viser à réduire les coûts de production de l'électricité solaire, et de créer les conditions économiques favorables à une plus large commercialisation.

A long terme, les systèmes thermosolaires doivent contribuer à la production bon marchée de combustibles (hydrogène par exemple). Ces objectifs font partie du programme de recherche sur l'énergie de la société Helmholtz (HGF).

Le DLR fait partie du réseau international SolarPACES (Solar Power and Chemical Energy Systems) de l'Agence Internationale d'Energie (AIE), réseau au sein duquel il assume de nombreuses fonctions de coordination. Dans ce cadre, il entretient des partenariats stratégiques avec des pays à fort ensoleillement comme l'Algérie ou Abou Dhabi. A l'échelle européenne, le DLR est membre de l'EUREC Agency. En collaboration avec des partenaires français, espagnols et suisses, le DLR a créé en 2004 l'alliance SOLLAB des laboratoires européens de recherche sur les systèmes CSP. Au niveau national, le DLR est membre de l'Association pour la recherche sur l'énergie solaire (FVS), qui regroupe de nombreux centres de recherche allemands dans le domaine des énergies renouvelables. En coopération avec des partenaires internationaux, le DLR coordonne et mène de nombreux projets financés par l'UE. Le ministère fédéral de l'environnement (BMU) soutient d'importants projets industriels en réseaux au niveau national. Afin d'atteindre leurs objectifs de recherche, le DLR structure ses activités avec des programmes et sous-programmes où chaque point

est traité à travers des projets interdisciplinaires dans lesquels des partenaires externes sont également impliqués. La partie suivante illustre cette stratégie sur la base d'exemples concrets.

Exemples de sous-programmes

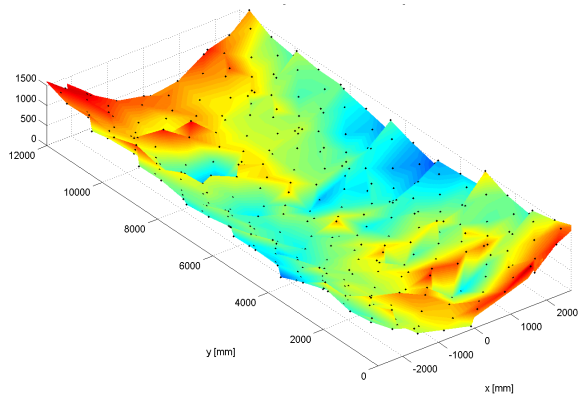
Application

Le sous-programme „Application“ vise à favoriser l'industrialisation de centrales thermosolaires via des études de faisabilité et des projets industriels de démonstration. La centrale solaire à tour expérimentale de Jülich (1,5 MWe) est un excellent exemple : une technologie de récepteurs solaires développée par le DLR y est installée et testée dans des conditions d'exploitation commerciale par le titulaire industriel de la licence. Le DLR est impliqué dans ce projet au niveau de la construction et de la mise en service de la centrale. Il participe également à l'analyse des résultats d'exploitation pour garantir son objectivité. De plus, l'installation peut être utilisée comme plateforme expérimentale pour l'optimisation de cette technologie. En collaboration avec des partenaires universitaires régionaux, le DLR a fondé un institut virtuel de recherche sur les centrales thermosolaires (vICERP) avec pour objectif le développement de nouvelles méthodes de calcul dynamiques. Ces méthodes doivent être dans un premier temps testées dans la centrale, avant d'être utilisées pour l'optimisation des réglages et du fonctionnement de la tour solaire

Test du récepteur volumétrique de la PSA : phase de construction (à gauche), tour en fonctionnement (au milieu), photo infrarouge (à droite)

Caractérisation

Dans le cadre du sous-programme „Caractérisation“, sont développées des méthodes de mesure et d'évaluation fines des systèmes à concentration, notamment des procédés optiques et par imagerie. Ces méthodes et outils ont été utilisés avec succès pour le développement du prototype de capteurs industriel Eurotrough, dont plus de 100 000 m² ont depuis été mis en service. Un capteur de Fresnel de la PSA a d'ores et déjà été caractérisé selon ces méthodes. Sur cette base, un centre de test et de caractérisation en cours de construction à Cologne développera, au profit des acteurs de ce nouveau marché, des méthodes standards pour tester les composants des capteurs. Les méthodes destinées à garantir la qualité du montage des collecteurs sont commercialisées par la start-up CSP-Services GmbH fondée par le DLR.



Mesure photogrammétrique d'un collecteur LS-3

Stockage thermique de l'énergie

L'objectif de ce sous-programme est de développer des solutions de stockage thermique (utilisant différents moyens caloporteurs) de l'énergie produite par les centrales CSP. Pour les technologies thermosolaires à focalisation linéaire fonctionnant avec de l'huile thermique, des accumulateurs solides à base de béton sont en cours de développement. Ils constituent une solution nettement avantageuse du point de vue économique par rapport aux systèmes de stockage thermique par sel fondu actuellement disponibles sur le marché.

Une autre priorité est mise sur le développement d'accumulateurs de vapeur à base de matériaux à changement de phase (MCP), comme par exemple les sels de nitrite dont les points de fusion peuvent facilement être adaptés aux températures de la vapeur dans les centrales thermiques. Le principe de l'accumulateur MCP consiste à utiliser l'énergie thermique de la vapeur produite pour faire fondre du sel. A l'inverse, l'énergie libérée par la solidification du sel peut être mobilisée pour la production de vapeur.

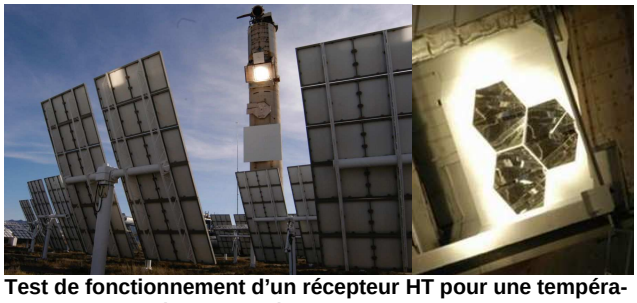
Prototype d'accumulateur à changement de phase sur la "Plataforma Solar de Almería"

La réalisation technique de cette idée requiert encore des études détaillées sur les matériaux et en ingéniérie thermique. Les premiers prototypes d'accumulateurs ont déjà pu être testés sur la plate-forme PSA.

Systèmes hautes températures (HT)

Dans ce sous-programme, des travaux de recherche sont menés afin d'augmenter la température de fonctionnement dans les centrales CSP, et d'améliorer ainsi l'efficacité du système global. Cela permet d'accroître le rendement énergétique par m² de surface de capteurs installés, et donc de diminuer les coûts de production.

Une priorité de ce sous-programme est le développement d'un récepteur HT qui soit capable de chauffer de l'air jusqu'à des températures supérieures à 1000℃ sous une pression de 15 bars, et qui puisse être couplé à une turbine à gaz. Cela permettra de profiter de la haute efficacité des centrales modernes à gaz à cycle combiné pour la production d'électricité solaire. Ce système restera exploitable en cas de couverture nuageuse ou après le couché du soleil en utilisant des combustibles fossiles ou renouvelables. Il pourra ainsi fournir de l'électricité en fonction de la demande. Il a déjà été démontré sur la plate-forme PSA que ce système pouvait fonctionner dans le cas d'une petite turbine à gaz. Un projet de démonstration pré-commercial de 5MW est en cours de développement.



Test de fonctionnement d'un récepteur HT pour une température de 1000℃ (à droite : détail)

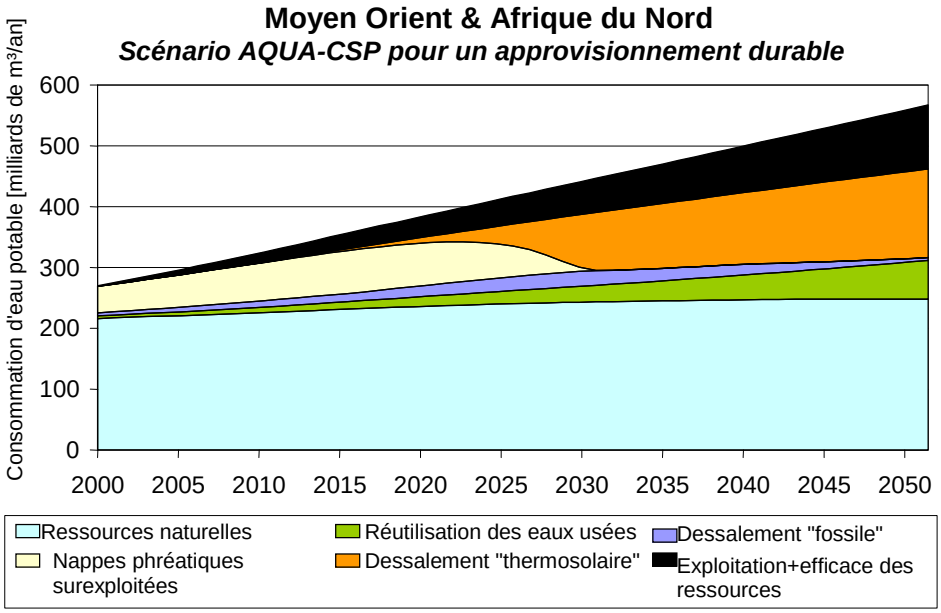
Transformations chimiques et énergie solaire

Ce sous-programme concerne le stockage de l'énergie solaire sous forme chimique, en d'autres termes la production de combustibles. Pour ce stockage, on a recours à des procédés hautes températures très similaires aux procédés de production d'électricité dans les centrales CSP. Le projet HYDROSOL, récompensé en 2006 par le prix Descartes de l'UE, en est un bon exemple. Ce projet a consisté à réaliser un cycle thermochimique permettant de séparer la vapeur d'eau en oxygène et en hydrogène, à partir de chaleur solaire haute température. Le principe de cette séparation repose sur l'oxydation d'un oxyde métallique présente sur une structure alvéolaire. Cette structure est en effet traversée par des molécules de vapeur d'eau qui apportent l'oxygène nécessaire à la réaction. En piégeant l'oxygène, la structure conduit parallèlement à la production d'hydrogène. Dans un deuxième temps, l'oxyde métallique, soumis à un débit de chaleur, libère l'oxygène, et le processus peut ainsi recommencer. Les tests réalisés dans le four solaire de Cologne-Porz ont pu en apporter la validation expérimentale. Actuellement, d'autres expériences sont menées au sein d'un réacteur solaire sur la plate-forme PSA.

Réacteur HYDROSOL 2 en fonctionnement sur la tour solaire de la Plataforma Solar de Almería.

Analyse des systèmes

L'objectif du sous-programme « analyse des systèmes » consiste notamment à étudier, à l'aide de scénarios énergétiques à moyen et long termes, les effets du développement des énergies renouvelables et l'influence des cadres politique et réglementaire. L'exemple le plus récent est l'étude AQUA-CSP, tout juste achevée. Celle-ci examine les moyens d'affronter les besoins croissants en eau au Moyen-Orient et en Afrique du Nord, liés à l'expansion démographique dans ces régions. Le principal résultat de cette étude est que les installations de dessalement de l'eau de mer à partir d'énergie solaire (thermique ou électrique) présentent un très grand potentiel pour combler les pénuries d'approvisionnement, de plus en plus importantes.



Contact

Prof. Dr.-Ing Robert Pitz-Paal
DLR, Institut de Thermodynamique techique, Cologne

Téléphone +49 (0) 2203 601 2744
Email Robert.Pitz-Paal@dlr

Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques pourront bientôt remplacer les centrales conventionnelles… à condition qu'un cadre politique adapté soit mis en place

Dr. Henner Gladen, Directeur technique, Solar Millennium AG

Dr Henner Gladen, né en 1962, est co-fondateur et directeur du département technologique de Solar Millennium AG à Erlangen. Il a effectué ses études et son doctorat en sciences des matériaux à l'Université d'Erlangen-Nuremberg. Il a de nombreuses années d'expérience de R&D dans le domaine de la construction de centrales thermiques et de superstructures et s'affirme comme un expert des nouvelles technologies et du développement stratégique de projets dans le secteur des techniques environnementales et de la production d'énergie.

Dipl.- Sven Moormann, Responsable communication, Solar Millennium AG

Sven Moormann, né en 1972, a fait des études en aménagement du territoire à l'Université de Dortmund et à l'Institut d'Urbanisme de Grenoble. Il est directeur de la communication chez Solar Millennium AG à Erlangen.

Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques : une technologie bien au point

Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques (ou centrales CSP) représentent la technologie de centrales solaires thermiques la plus développée. La Banque Mondiale la décrit comme „proven technology", autrement dit comme une technologie qui a déjà prouvé qu'elle était opérationnelle. Aux Etats-Unis, les centrales CSP produisent ainsi depuis plus de 20 ans de l'électricité à l'échelle commerciale. Entre 1984 et 1990, 9 centrales, d'une capacité totale de 354MW, ont vu le jour sur 3 sites dans le désert de Mojave en Californie. Mais une baisse des prix des énergies fossiles a eu pour effet qu'aucune autre centrale n'a plus été construit depuis. Les centrales sont toujours en exploitation aujourd'hui. Depuis leur mise en service, elles ont alimenté le réseau électrique californien avec plus de 12 milliards de kWh.

Il a fallu attendre jusqu'en 2007 aux Etats-Unis pour qu'une nouvelle centrale CSP, la « Nevada Solar One » (64MW), soit raccordée au réseau. Et en Europe, les premières centrales CSP - Andasol 1, 2 et 3 - sont en train de voir le jour dans le sud de l'Espagne. Andasol 1 doit être raccordé au réseau d'ici la fin 2008 et devrait fournir de l'électricité verte à 200.000 personnes. Elle sera suivie en 2009 par la mise en service d'Andasol 2 puis, sur le même site, par celle d'Andasol 3 en 2010. Ces projets ont été développés par Solar Millennium (au sud de l'Allemagne) et réalisés en coopération avec des partenaires espagnols.

Dans le principe, le fonctionnement d'une centrale CSP est très similaire à celui d'une centrale conventionnelle. La seule différence est que l'énergie qui permet d'actionner la turbine à vapeur ne provient pas de la combustion de sources fossiles mais de la concentration des rayons du soleil.

Capteurs cylindro-paraboliques sur un champ solaire

Sur le champ solaire d'Andasol, qui s'étend sur 510.000 m^2 (l'équivalent de 70 terrains de football), les miroirs paraboliques focalisent les rayons du soleil sur un tube récepteur dans lequel circule un fluide caloporteur à une température d'environ 400°C.

Afin d'éviter de trop grandes pertes d'énergie par radiation thermique, le tube récepteur est entouré d'un tube de verre isolé sous vide. Le fluide caloporteur libère son énergie dans un échangeur de chaleur. Cette énergie est utilisée pour produire de la vapeur d'eau qui entraîne une turbine, exactement comme dans les centrales thermiques conventionnelles.

Les nets avantages du stockage thermique

Les centrales solaires thermiques présentent un net avantage par rapport aux autres technologies énergétiques renouvelables, comme par exemple le photovoltaïque et l'énergie éolienne : la chaleur solaire peut être stockée beaucoup plus efficacement que l'électricité, et il est à tout moment possible de produire de l'électricité à partir de chaleur accumulée. Pour pouvoir continuer à fonctionner après le coucher du soleil, les centrales Andasol disposent d'un système de stockage thermique sous forme de deux réservoirs contenant chacun 28.500 tonnes de sel fondu (un mélange de sel de potassium et de nitrate de sodium). L'accumulateur permet une durée supplémentaire de fonctionnement à plein régime de 7,5 heures. Il est ainsi possible de produire de l'électricité même la nuit ou en cas de couverture nuageuse. De cette manière, le nombre d'heures de fonctionnement et la quantité d'électricité produite par an peuvent être presque doublés par rapport à au cas d'autres centrales thermosolaires. En conséquence, la production brute d'électricité de chaque centrale Andasol (50MW) atteint 180GWh par an.

Du point de vue de la rentabilité économique, il est possible d'envisager des puissances allant jusqu'à 250MW pour les centrales CSP. La restriction de la puissance des centrales Andasol à 50MW chacune est due à une limitation juridique en Espagne, définie par les directives de soutien en vigueur.

En Espagne, les centrales d'Andasol contribueront à couvrir les pics de la demande électrique pendant les mois d'été, pics qui sont dus notamment à la consommation élevée des systèmes de climatisation. L'avantage ici : comme dans toutes les régions fortement ensoleillées, l'offre électrique des centrales thermodynamiques coïncide bien avec la demande. En effet, dans ces pays, la demande électrique est maximale en début d'après-midi, au moment où le rayonnement du soleil - et donc la puissance des centrales – est également maximal.

Les centrales espagnoles doivent leur rentabilité économique à l'existence d'un système de rachat de l'électricité solaire à des tarifs préférentiels, en vigueur depuis septembre 2002. En effet, l'électricité d'origine thermosolaire bénéficie d'un tarif d'achat garanti par la loi s'élevant à presque 27 centimes d'euros par kWh sur une période de 25 ans. Ce cadre législatif et les conditions climatiques favorables font actuellement de l'Espagne le marché le plus attrayant pour la production d'électricité thermosolaire.

Les futurs marchés les plus importants seront les Etats fédéraux du sud-ouest des Etats-Unis et la région MENA (Proche-Orient et Afrique du Nord). Des pays comme la Chine et l'Australie sont également très bien adaptés.

Même si les centrales CSP sont particulièrement bien adaptées pour couvrir les besoins en électricité de pointe et de semi-base, on peut également envisager de les exploiter pour couvrir les besoins électriques de base. En effet, sous leur forme hybride, les centrales peuvent fonctionner non seulement à partir d'énergie solaire mais aussi avec du gaz naturel ou du gaz renouvelable et ainsi produire de l'électricité 24h/24.

Sites d'implantation des centrales CSP

Les sites géographiquement les plus appropriés pour l'exploitation de l'énergie thermosolaire se trouvent dans une ceinture équatoriale correspondant à une latitude comprise entre 40°N et 40°S. Ici, le rayonnement solaire est suffisamment intense ($\geq$1900 kWh/m^2) pour garantir un fonctionnement économiquement rentable. Le nombre des lieux d'implantation techniquement adaptés et théoriquement disponibles, comme par exemple les régions désertiques, est suffisant pour couvrir plusieurs fois la demande électrique mondiale avec des centrales solaires thermiques. Ainsi, moins de 3% de la surface du Sahara suffirait théoriquement à satisfaire les besoins mondiaux en électricité.

Importations d'électricité solaire

Dans de nombreux pays adaptés à l'exploitation de centrales thermodynamiques, la demande énergétique augmente. Il faut utiliser le potentiel que représente le thermosolaire dans ces pays pour couvrir de manière durable les besoins en énergie. A moyen terme, la production d'électricité thermosolaire ga-

gnera également en importance en Europe centrale. Depuis des années, les experts discutent de la possibilité d'importer de l'électricité solaire, par exemple depuis les déserts d'Afrique du Nord. Des études du DLR (Centre allemand de recherche aérospatial) confirment qu'un tel scénario est réalisable dans les années qui viennent.

En utilisant des lignes de courant continu à haute tension (CCHT), le transport de l'électricité sur une distance de plus de 3.000 km peut être réalisé avec seulement 10% de pertes. Cette valeur est très faible comparée au au cas des lignes de courant alternatif à haute tension, qui occasionneraient sur cette même distance des pertes d'environ 45%. Des réseaux CCHT existent déjà de par le monde, par exemple entre l'Irlande du nord et l'Ecosse ou entre les centrales de l'Etat fédéral américain de l'Orégon et la région autour de Los Angeles, autrement dit partout où il faut surmonter de longues distances. L'importation de grandes quantités d'électricité suppose néanmoins un développement des réseaux existants. Selon une étude du DLR, 15% de la demande électrique européenne pourrait être couverte d'ici 2050 par des importations d'électricité solaire.

Le sujet des importations d'électricité solaire a été dernièrement abordé en haut lieu, dans le cadre de la création, mi-juillet, de l'Union pour la Méditerranée : l'élaboration d'un plan d'énergie solaire a été déclarée une priorité pour la coopération visée entre l'UE et les Etats riverains du sud de la Méditerranée. Des alliances comme l'Union pour la Méditerranée ouvrent la voie vers un développement durable, car seule une action politique multilatérale peut concrétiser la vision d'un système d'importation d'électricité solaire. Une coopération politique internationale à long terme peut rendre possible le nécessaire développement de réseaux à courant continu transfrontaliers.Tous les partis impliqués profiteront de cet effort de collaboration : les pays d'Afrique du Nord en sortiront économiquement plus forts, et l'Europe verra la sécurité et la stabilité de son approvisionnement en énergie renforcées grâce à la diversification de son mixe énergétique.

Perspectives économiques

Le cadre politique actuel rend possible la réalisation des premiers projets de centrales CSP. La technologie de production d'électricité thermosolaire présente un fort potentiel de réduction des coûts. D'ici quelques années seulement, elle sera compétitive avec les technologies de production d'électricité de pointe et de semi-base exploitant les sources d'énergie fossiles. Les experts sont d'accord pour dire que le secteur du solaire thermodynamique va connaître une forte croissance : aussi bien l'agence internationale de l'énergie (AIE) que Greenpeace et le « US Department of Energy » pronostiquent pour 2020 une puissance installée d'au moins 20.000 MW. Greenpeace et le Conseil européen pour les énergies renouvelable (EREC) prédisent même 267.000 MW pour 2040. Le DLR part du principe que les énergies renouvelables auront, d'ici 2050, largement détrôné les énergies fossiles dans les pays du pourtour méditerranéen et que les centrales thermosolaires produiront deux fois plus d'électricité que les centrales éoliennes, PV, à biomasse et géothermiques réunies.

Afin de garantir la sécurité des investissements, il est néanmoins nécessaire de mettre en place des cadres réglementaires tarifaires nationaux pour la production d'électricité thermosolaire. C'est seulement de cette manière qu'il sera possible de réaliser rapidement et durablement le potentiel de croissance des centrales thermodynamiques et le potentiel de réduction des coûts via une poursuite du développement technologique. La création de mécanismes tels que le commerce des certificats d'émission est également essentiel pour encourager les investissements importants nécessaires.

Contacts

Henner Gladen
Solar Millennium, Berlin
Téléphone +49 (0) 9131 9409-122
Email gladen@SolarMillennium.de

Sven Moormann
Solar Millennium, Berlin
Téléphone +49 (0) 9131 9409-0
Email moormann@SolarMillennium.de