

Les Savanturiers

En mission avec les scientifiques du CEA

n°9

Sous le Soleil exactement

Actuellement, pour ses besoins dans les transports et l'habitat, la France importe 50 % de sa consommation totale d'énergie sous forme de combustibles fossiles. Que ce soit au niveau européen ou national, des objectifs ont été fixés : réduire les émissions de gaz à effet de serre ; améliorer la consommation énergétique des bâtiments ; augmenter la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique. Dans ce contexte, l'énergie solaire joue un rôle primordial et des équipes du CEA s'y attachent, en France comme à l'étranger. Suivons-les !

Les panneaux solaires photovoltaïques sont testés à Chambéry, avant d'être installés sur site, comme ici au Burkina Faso.



© O. WIss/CEA



Sommaire :

Comprendre
Le photovoltaïque
Pages 2-3

Au labo
Tout sur la filière
solaire
Pages 4-5

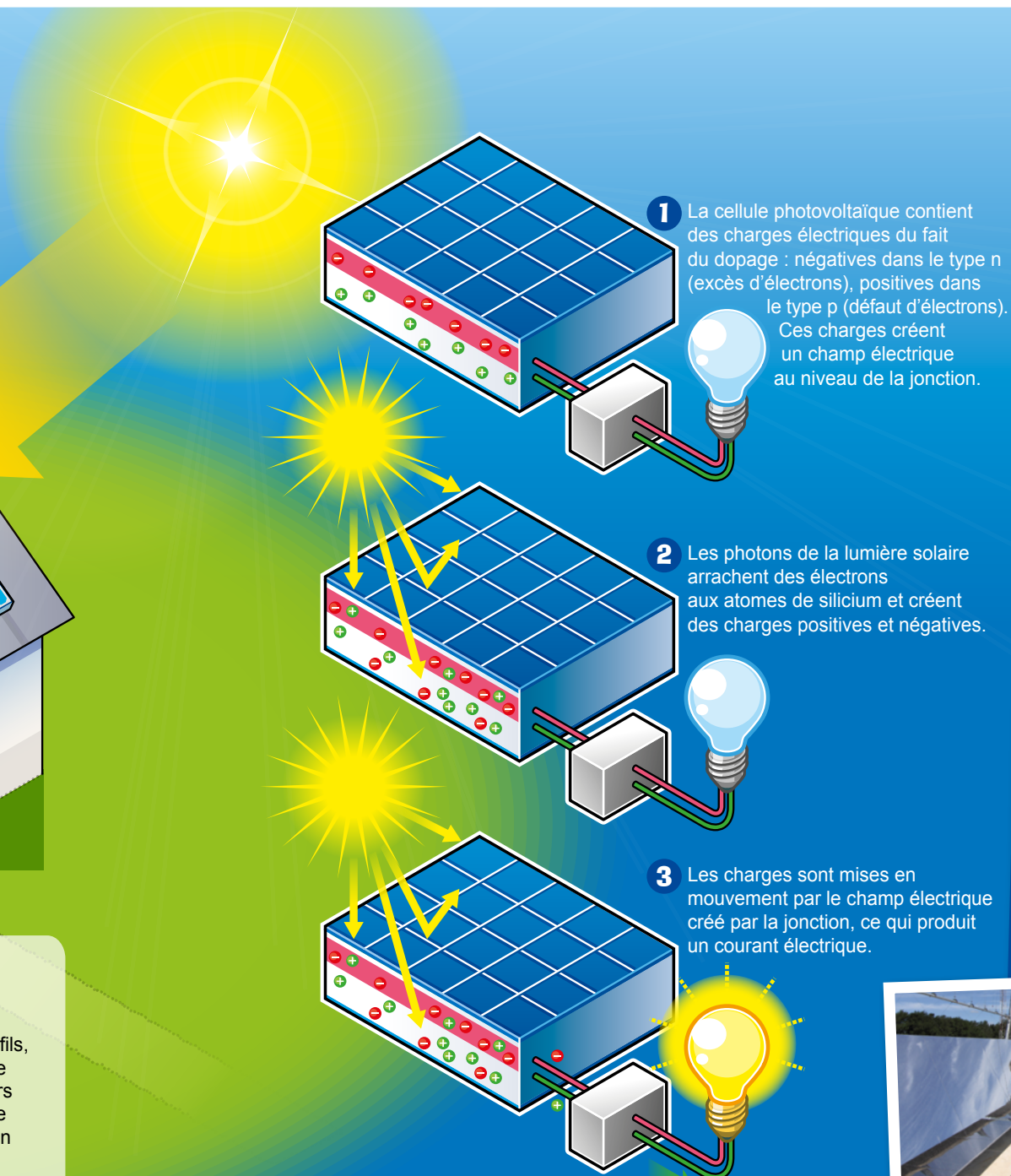
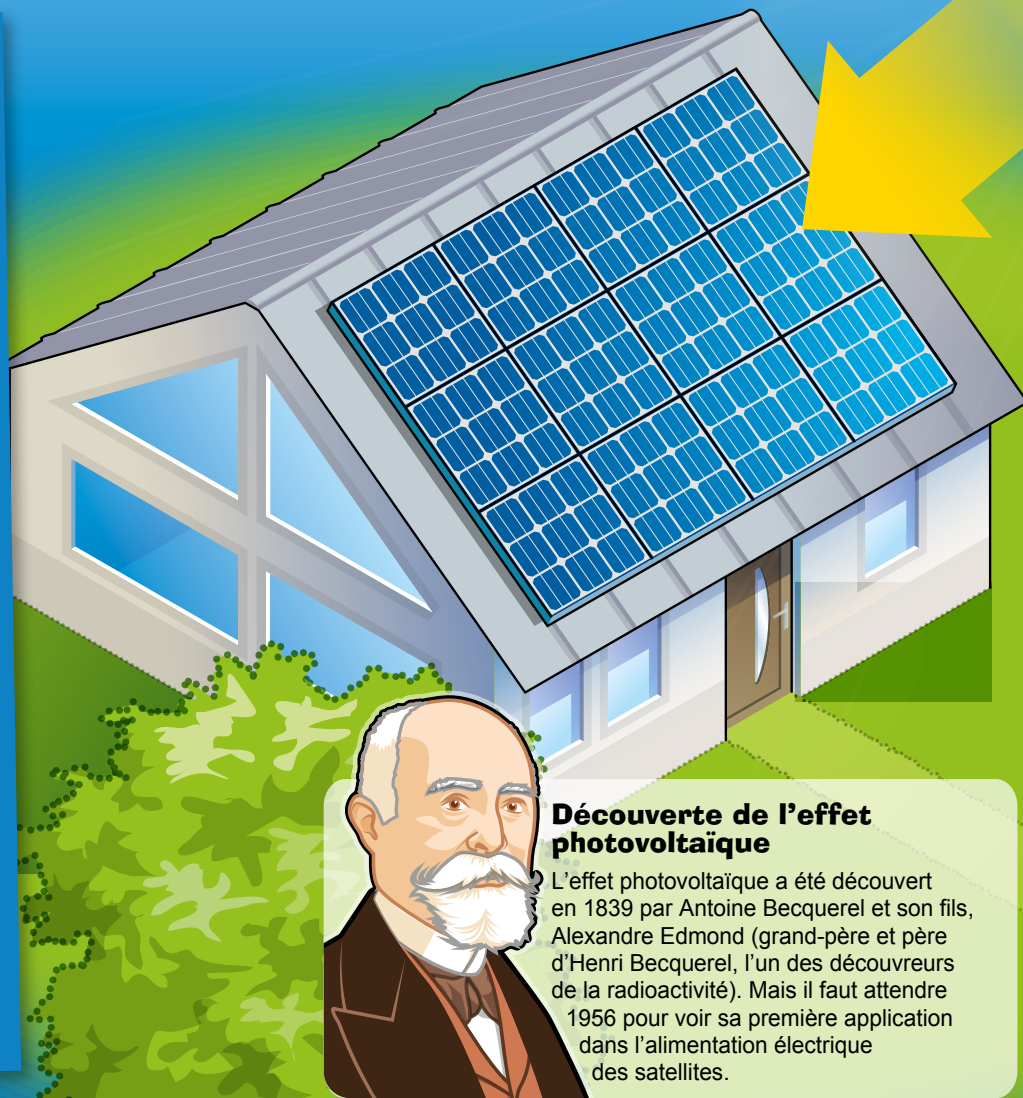
© L. Chamussy/Spa-CEA

Comprendre : le photovoltaïque

Dans l'éventail des énergies bas carbone, le solaire a une place de roi. Présent partout, il est néanmoins nécessaire de développer des capteurs et des méthodes de stockage pour en permettre une meilleure utilisation dans notre vie quotidienne.

Qu'est-ce que l'énergie solaire ?

L'énergie solaire fait partie des énergies renouvelables, comme l'éolien, l'hydraulique, la **biomasse** et la géothermie. Toutes ces énergies se renouvellent naturellement assez rapidement pour pouvoir être considérées comme inépuisables à l'échelle de temps humaine. Présente partout sur Terre, l'énergie solaire peut être exploitée de trois manières : le solaire thermique transforme directement le rayonnement en chaleur, le solaire thermodynamique à concentration et le solaire photovoltaïque produisent de l'électricité. En France, le bâtiment représente 44 % de la consommation d'énergie, devant les transports et l'industrie, et 25 % des émissions de CO₂. C'est donc un enjeu prioritaire pour le mix énergétique à venir. Qu'il soit thermique ou photovoltaïque, le solaire peut être directement consommé : cela en fait une énergie de choix pour les sites isolés : montagne, milieu rural, îles...



Et le solaire thermique ?

L'énergie solaire thermique est utilisée principalement pour le chauffage de l'eau ou des locaux. Le principe est simple : des capteurs absorbent les photons et les transforment en chaleur. Celle-ci est ensuite transmise à un liquide ou un gaz (appelé caloporteur) qui la transporte vers un réservoir de stockage.

4 m² de capteurs thermiques = besoins en eau chaude de 4 personnes
10 m² = chauffage d'une maison de 100 m²

L'énergie thermodynamique à concentration permet de produire de l'électricité. Comment ? Les rayons solaires arrivent sur des miroirs (héliostats) qui les concentrent sur un caloporteur, qui est alors chauffé à plusieurs centaines de degrés. Cette chaleur est ensuite convertie en énergie mécanique, puis électrique au moyen d'une turbine couplée à une génératrice de courant.



Comment marche une cellule photovoltaïque ?

Une cellule photovoltaïque tire profit des propriétés **optoélectroniques** des **semi-conducteurs** qui permettent, sous certaines conditions, de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique. La technologie la plus développée utilise le **silicium** comme matériau de base. Une cellule photovoltaïque peut être, par exemple, constituée de deux couches de silicium dont on aura modifié, par **dopage**, les propriétés de transport électrique. L'ajout d'atomes de bore favorisera la conduction par charges positives. Le silicium sera de type p. Le dopage par des atomes de phosphore améliorera la conduction

par charges négatives. Le silicium sera alors de type n. La mise en contact d'un silicium dopé p et d'un silicium de type n se traduit par la création d'une jonction, dite p-n. Lorsqu'on expose la cellule au Soleil, des électrons et des trous sont générés au niveau de la jonction p-n, considérée comme la zone active de la cellule. Ces électrons et ces trous se déplacent ensuite pour atteindre les électrodes. Cette succession de processus, appelée effet photovoltaïque, conduit ainsi à la production d'un courant électrique.



Lexique :

Biomasse : Énergie renouvelable issue de l'ensemble des matières organiques d'origine végétale ou animale.

Dopage : Le dopage d'un matériau semi-conducteur consiste à introduire des atomes d'un autre matériau qui, en se substituant, vont introduire davantage d'électrons ou de trous et ainsi modifier les propriétés de conductivité.

Optoélectronique : L'optoélectronique est à la fois une branche de l'électronique et de la photonique. Elle concerne l'étude des composants électroniques qui émettent ou interagissent avec la lumière.

Semi-conducteurs : Matériau dont la conductibilité électrique est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.

Silicium : Élément le plus abondant sur la croûte terrestre, sous forme de composé, par exemple la silice (dans le sable, le quartz...), ou autres silicates.

En savoir +

- À lire les livrets pédagogiques « Énergies du XXI^e siècle » et « Le Soleil » sur www.cea.fr/le-cea/publications/livrets-thematiques2/livrets-thematiques
- Téléchargez le poster « Les cellules photovoltaïques » sur www.cea.fr/jeunes/espace-enseignants/ressources/les-posters-pedagogiques-du-cea
- Découvrez l'animation thématique « Les panneaux solaires » sur www.cea.fr/jeunes/mediatheque/animations-flash/energies/les-panneaux-solaires/%28offset%29/12

Tout sur la filière solaire

Dès les années 1970, le CEA développe des applications solaires thermiques ; avec notamment les premières maisons, hôpitaux et hôtels installés dans le Pacifique. Depuis 1980, il étend ses recherches dans les domaines du solaire photovoltaïque et thermodynamique pour le bâtiment.



Étape de cristallisation de plaques de silicium.

© P.Dumas/CEA

Du silicium aux modules

La plate-forme Restaure est dédiée à la fabrication de cellules photovoltaïques sur silicium, de l'étude à la caractérisation. Les traitements sont réalisés dans des salles blanches et sous **hygrométrie** contrôlée, sur des équipements proches de l'industrie, ce qui facilite le transfert des procédés. Ces cellules sont ensuite assemblées pour former des modules, ou panneaux solaires.

Pour le photovoltaïque, la R&D vise à :

- Améliorer le **rendement** et réduire les coûts des cellules ;
- Augmenter les performances de systèmes innovants, de la cellule aux **modules** ;
- Améliorer les solutions de stockage de l'énergie accumulée (via de nouvelles batteries).



© Artechnique/CEA

Banc de traitement chimique



© P.Dumas/CEA

Four de diffusion de bore et phosphore



© Artechnique/CEA

Dépôt de couche anti-réfléchissante



© P.Dumas/CEA

Sérigraphie des contacts métalliques



Tests en conditions réelles sur la plate-forme Inca.

© P.Avavian/CEA

Des équipes complémentaires

Créé en 2006, l'Institut national de l'énergie solaire (Ines) regroupe des plates-formes de « recherche, développement, innovations industrielles », « caractérisation et démonstration » et « éducation ». Ses équipes étudient l'ensemble de la filière solaire photovoltaïque : matériau silicium, cellules, modules, systèmes, stockage de l'électricité, démonstration et tests. Elles s'intéressent aussi à l'intégration de l'énergie solaire et la gestion active de l'ensemble des sources thermiques et électriques dans les bâtiments. Ceux-ci doivent devenir « à énergie positive » produisant, à terme, plus d'énergie qu'ils n'en consomment ; ce qui deviendra rapidement le standard au niveau européen. Enfin, le couplage habitat + voiture électrique (système appelé mobilité solaire) est également un axe de recherche majeur. Les véhicules pourraient être rechargés grâce à l'énergie solaire tout au long de la journée, sur des bornes implantées sur les lieux de travail, les parkings des grandes surfaces...



© P.Dumas/CEA

Test et caractérisation d'un module



© C.Dupont/CEA

Lamination des modules



© P.Dumas/CEA

Mesure de l'efficacité



© C.Dupont/CEA

Interconnexion des cellules

Zoom

Comme à la maison

Quatre maisons permettent de tester en grandeur réelle les performances énergétiques de divers matériaux, parois, isolants, vitres et solutions de stockage d'énergie. Pour cela, chacune est équipée de plus de 150 capteurs, générant des milliers de données quotidiennes.

Smart-grid

Les smart-grids, ou réseaux électriques intelligents, permettent de gérer l'ensemble de la chaîne énergétique, de la production à la consommation. L'intégration des nouvelles technologies de l'information et de la communication aux réseaux électriques les rendra communicants et permettra d'assurer l'équilibre entre l'offre et la demande à tout instant. Le système sera piloté de manière plus flexible pour gérer les contraintes liées à l'intermittence des énergies renouvelables et le développement de nouveaux usages tels que le véhicule électrique.

Lexique :

Hygrométrie : L'humidité de l'air est mesurée, contrôlée et maintenue à un taux constant.

Module (ou panneau solaire) : Ensemble de cellules photovoltaïques interconnectées, entièrement protégé de l'extérieur (intempéries, UV, corrosion...).

Rendement : En physique, il désigne le rapport entre l'efficacité énergétique réelle d'une machine et son efficacité théorique maximale, plus ou moins performante du fait de l'existence d'imperfections, de gaspillage, de déchets, d'inertie...

En savoir +

- Voir l'animation « Habitats intelligents » : sur www.cea.fr/jeunes/mediatheque/animations-flash/energies/des-habitats-intelligents/%28offset%29/24
- À voir une vidéo sur les « Smart-grids » sur www.cea.fr/jeunes/mediatheque/videos/dossiers/smart-grids-vers-un-reseau-electrique-autonome/%28offset%29/12



© C. Dupont/CEA

« Avec le photovoltaïque, la production est répartie au plus proche des consommateurs. »

Nicolas Martin

Responsable du laboratoire
Systèmes électriques intelligents

Les Savanturiers : Quelle est la mission du laboratoire ?

Nicolas Martin : Nous sommes chargés du développement d'algorithmes de gestion d'énergie, pour mieux intégrer le photovoltaïque dans les réseaux électriques, mais aussi dans son usage, coupler la production avec la consommation, dans l'habitat, les transports électriques... Pour cela, on se base sur de l'expérimentation afin d'élaborer des modèles pour dimensionner les infrastructures électriques au plus juste, on évite alors des surcoûts importants. Ces mesures nous servent également à développer nos lois de gestion d'énergies. Cela passe par la simulation mais également par des essais « *hardware in the loop* » : on mixe un environnement simulé avec un environnement réel. Par exemple, on teste le comportement d'un onduleur photovoltaïque réel connecté au réseau électrique de la Martinique qui

est, quant à lui, simulé.

Comment concilier nouveaux modes de production et de consommation ?

Le plus gros avantage du photovoltaïque est qu'il est décentralisable et intégrable au bâti. Encore aujourd'hui, la production est principalement centralisée mais le réseau électrique permet de transporter et distribuer l'électricité jusqu'au consommateur final. Avec le photovoltaïque, la production est répartie au plus proche des consommateurs. Mais le solaire est, par définition, non prévisible et non contrôlable. Il nous faut donc gérer ces systèmes pour faire coïncider la production avec nos heures de consommation. Jusqu'à présent, on a considéré le photovoltaïque comme une source de revenu, en revendant l'énergie produite. On prend de plus en plus conscience que cette énergie de proximité immédiate se doit d'être au maximum autoconsommée ; cela permet de sensibiliser les personnes à la notion d'énergie mais également au fait de consommer localement ce qu'ils produisent (comme les légumes !).

Sur quels territoires travaillez-vous ?

Principalement en France métropolitaine, mais aussi dans les **DOM-TOM**

où le photovoltaïque est très compétitif. Ces territoires sont représentatifs d'énormes marchés à l'export, notamment l'Afrique, l'Amérique du Sud et l'Asie. Dans ces pays, tous les « petits » réseaux électriques, de l'ordre de 200 MW, sont à base de générateurs diesel, avec des coûts de production très élevés. Le photovoltaïque est avantageux économiquement et on a intérêt à produire un maximum d'énergie ainsi. Cela n'est pas si simple car, s'il y a peu de contraintes à introduire 30 % d'énergie photovoltaïque sur un réseau électrique, ce n'est pas la même chose pour un réseau 100 % solaire !

Formation :

- Bac S
- Classes préparatoires scientifiques
- École nationale d'ingénieur des Arts et Métiers à Aix-en-Provence
- Formation sur l'insertion de la production décentralisée dans les réseaux électriques



© C. Dupont/CEA

« Nous travaillons à un niveau pré-industriel pour être au plus près des conditions réelles. »

Maryline Joanny

Ingénieur Chef de projet

Quelle est votre mission au sein de l'Ines ?

Maryline Joanny : Les équipes du CEA travaillent sur l'intégralité de la chaîne photovoltaïque : depuis les matériaux jusqu'aux systèmes, en passant par les cellules et les modules. Je suis chargée de développer, en partenariat avec la société FranceWafer, une nouvelle technologie de panneaux solaires, plus performants et plus compétitifs, les modules bifaces. Ceux-ci tirent profit de l'éclairage en face arrière, issu des réflexions provenant de l'environnement (neige, sable, herbe...) ou de surfaces réfléchissantes (peinture, bâches blanches...).

Avez-vous des équipements spécifiques ?

Nous travaillons à un niveau pré-industriel, pour être au plus près des

conditions réelles. Nous disposons d'une plate-forme Modules de 15 MW pouvant atteindre des cadences de 10 modules par heure. Ces derniers sont testés en laboratoire avec un simulateur solaire. Puis ils sont caractérisés en extérieur, ici à Chambéry, à Cadarache ou en Corse.

Travaillez-vous pour ou avec des industriels ?

Nous établissons des relations de partenariat avec les industriels français. Nous les accompagnons dans leurs efforts d'innovation et de compétitivité en développant de nouvelles technologies. Par exemple, nous travaillons avec la société Arkéma autour de nouveaux matériaux polymères très performants, qui seront intégrés dans les procédés de fabrication des modules photovoltaïques.

Où pourront être implantés ces nouveaux modules ?

La technologie de modules bifaces répond aux besoins des marchés **émergents** comme le Moyen Orient et l'Amérique du Sud, qui disposent d'un fort ensoleillement et de la matière

première pour produire du silicium. Des personnes de l'équipe partent régulièrement, au Qatar et au Brésil, pour assister au montage de projets. Et nous recevons de nombreuses visites d'industriels intéressés par nos développements. Nous travaillons également sur des modules innovants, qui pourront s'intégrer plus facilement aux bâtiments : plus petits pour être répartis dans les villes sur des luminaires ou au sol, galbés en forme de tuiles pour les toitures...

Formation :

- Bac S
- École d'ingénieur : École supérieure d'optique (Institut d'optique Graduate School) à Paris



© C. Dupont/CEA

« L'important est d'être à l'écoute des populations et de comprendre comment elles vivent. »

Olivier Wiss

Ingénieur Chef de projet

Les Savanturiers : Qu'est-ce qu'un système électrique intelligent ?

Olivier Wiss : C'est la meilleure façon d'utiliser l'énergie produite par les systèmes photovoltaïques pour la rendre disponible pour les usagers ; et ce à toutes les échelles. Le but est de l'injecter dans le réseau national, insulaire (Corse, Martinique, La Réunion) ou localement dans l'habitat, sur de tout petits réseaux. Nos axes de développement portent principalement sur les systèmes électroniques et l'intelligence qui va autour.

Est-ce que l'énergie est disponible directement ?

L'énergie photovoltaïque est un courant continu qu'il faut convertir en alternatif si l'on veut s'en servir. Comme toutes les énergies renouvelables, c'est une énergie variable qu'il faut gérer en fonction des besoins, en passant, si nécessaire, par des systèmes de stockage, les batteries.

Etes-vous parti en mission à l'étranger ?

Oui. Nous avons des partenariats au Burkina Faso, où le principal besoin est l'électrification rurale. L'énergie,

c'est de l'artisanat, c'est du froid, c'est du commerce... Actuellement, ils ont recours à des générateurs diesel chers et polluants, alors qu'ils ne produisent pas de pétrole.

Le photovoltaïque présente d'énormes avantages, mais il reste le problème de maintenance des batteries. Nous développons des plates-formes expérimentales et de formation.

Une autre destination ?

Au Brésil, tandis que les besoins énergétiques augmentent fortement, la production majoritairement hydraulique est mise à mal suite aux dernières années de sécheresse. Le pays est très étendu et les réseaux de distribution sont très hétérogènes. En Amazonie, ils salent les aliments pour les conserver mais cela entraîne des problèmes sanitaires. Le photovoltaïque leur apporte le froid et l'éclairage nécessaires tout au long de l'année. Nous sommes allés installer des démonstrateurs comprenant des chaînes de production et des systèmes de gestion de l'énergie produite, dans cette région et dans des zones déjà électrifiées. Les résultats sont encourageants ; j'espère y retourner d'ici deux ans.

Un bilan de ces missions ?

L'accueil est en général très bon. L'important est d'être à l'écoute des populations et de comprendre comment elles vivent, pour bien évaluer quels sont leurs besoins prioritaires.



Brésil

© O. Wiss/CEA



Burkina Faso

© O. Wiss/CEA

Formation :

- Bac F3 (électrotechnique)
- DUT Génie électrique et informatique industrielle
- Reprise d'études après 10 ans d'activités professionnelles
- Ingénieur énergéticien INPG
- Master de recherche en Énergétique

Le solaire pour tous

Telle pourrait être la devise de l'Ines qui s'est associé à la Fondation Energies pour le Monde et Electriciens sans frontières pour mener plusieurs actions humanitaires. Comme celle avec la fondation qui a permis à plus d'un million de personnes de 27 pays de l'hémisphère sud d'être alimentées en électricité, indispensable pour faire vivre dispensaires et écoles. Avec ESF, 1 000 bénévoles peuvent être mobilisés à tout moment pour répondre à des situations d'urgence, comme ce fut le cas à Haïti. www.energies-renouvelables.org et www.electriciens-sans-frontieres.org

La cité du Soleil

L'Ines était présent à la cité du Soleil à Versailles, début juillet 2014. 20 prototypes d'habitat solaire, 800 étudiants architectes et ingénieurs, 16 pays... ont participé au concours Solar Decathlon Europe. Le principe était de proposer des projets répondant à des problématiques environnementales. À découvrir sur www.solardecathlon2014.fr/

Lexique :

DOM-TOM : Départements et territoires d'Outre-Mer, comme la Martinique ou La Réunion.

Pays émergents : Pays en voie de développement qui vivent une forte croissance économique.

En savoir +

- Retrouvez ces chercheurs et d'autres scientifiques sur le site www.cea.fr/jeunes/mediatheque/videos/metiers
- Une vidéo spéciale « Bâtiment et énergie » sur www.cea.fr/jeunes/mediatheque/videos/dossiers/%28offset%29/36
- Comprendre « La filière solaire silicium » avec la vidéo sur www.cea.fr/jeunes/mediatheque/videos/dossiers/la-filiere-solaire-silicium/%28offset%29/48

Quiz

L'Ines sera présent sur le Salon « Energies renouvelables et efficacité énergétique » et recherche des étudiants pour l'accueil des visiteurs et la distribution de documentations. Un casting est proposé afin de retenir les candidats les plus calés dans ce domaine. Entraînez-vous et tentez votre chance !

1 L'énergie photovoltaïque est utilisée pour :

- Produire de l'électricité
- ▼ Chauffer les habitations
- Cuisiner

2 L'effet photovoltaïque a été découvert par :

- ▼ Robert Watson-Watt
- Ernest Hemingway
- Antoine Becquerel

3 Pourquoi doper une cellule photovoltaïque ?

- ▼ Pour augmenter son pouvoir d'absorption des rayonnements solaires
- Pour augmenter ses propriétés de transport électrique
- Pour éviter de se brûler en la manipulant

4 Parmi les étapes de fabrication d'une cellule, laquelle n'existe pas :

- Le dépôt de couche anti-réfléchissante
- ▼ L'interconnexion des cellules
- La peinture fluorescente

5 Qu'est-ce qu'un smart-grid ?

- Un réseau électrique intelligent permettant de gérer la chaîne énergétique de la production à la consommation
- Une connexion internet pour mettre en route les appareils électroménagers dans une habitation
- ▼ Un petit grille-pain alimenté par l'énergie solaire



© P. Avavian - CEA



6 Maryline et son équipe travaillent sur de nouveaux modules bifaces, où seront-ils implantés ?

- ▼ En Islande et au Danemark
- Au Moyen Orient et en Amérique du Sud
- En Océanie et à Madagascar

7 Nicolas parle de « hardware in the loop », cela signifie :

- Mixer un environnement simulé avec un environnement réel, pour développer des lois de gestion d'énergies
- Étudier au microscope de nouveaux matériaux, afin d'optimiser le rendement final d'une cellule
- ▼ Créer un langage informatique universel, pour que tous les chercheurs mettent en boucle leurs recherches

8 Olivier apporte des solutions aux problèmes :

- D'électrification rurale
- De dessalement d'eau de mer
- ▼ De production de glace

Sites :

CEA : www.cea.fr
CEA jeunes : www.cea.fr/jeunes
Ines : www.ines-solaire.org/

Retrouvez les Savanturiers en version web :
www.cea.fr/le_cea/publications/les_savanturiers/

Solutions : Pour être sélectionné, il ne faut avoir que des ■. Mais il y a parfois plusieurs réponses possibles : en question 1, les 3 réponses sont correctes ; en question 8, les réponses ■ et ▲ sont justes.



Éditeur : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, RCS Paris B 775 685 019
Directeur de la publication : Xavier Clément
Ont participé à ce numéro : Maryline Joanny, Florence Klotz, Lucia Le Clech, Catherine Maniglier, Nicolas Martin, Olivier Wiss.
Infographies : Antoine Levesque
Création, réalisation et impression : NPO* - www.nepasoublier.fr - Octobre 2014
ISSN 2271-6262

Nous remercions Fabienne Chauvière d'avoir accepté que nous empruntions le titre de son émission.

