

Annuaire du Collège de France

122^e année

2021
2022

Résumé des cours et travaux



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

INNOVATION TECHNOLOGIQUE LILIANE BETTENCOURT* (CHAIRE ANNUELLE 2021-2022)

Daniel Lincot

Directeur de recherche émérite au CNRS,
professeur invité au Collège de France

La série de cours et de séminaires « Énergie solaire photovoltaïque et transition énergétique » est disponible en audio et en vidéo sur le site internet du Collège de France (<https://www.college-de-france.fr/fr/agenda/cours/energie-solaire-photovoltaïque-et-transition-énergétique>), ainsi que le colloque « Énergie solaire et société » (<https://www.college-de-france.fr/fr/agenda/colloque/energie-solaire-et-societe>). La leçon inaugurale « Énergie solaire photovoltaïque et transition énergétique », prononcée le 20 janvier 2022, est également disponible en audio et vidéo (<https://www.college-de-france.fr/fr/agenda/lecon-inaugurale/energie-solaire-photovoltaïque-et-transition-énergétique-0>). Celle-ci a fait l'objet d'une publication : D. Lincot, *Énergie solaire photovoltaïque et transition énergétique*, Paris, Collège de France/Fayard, coll. « Leçons inaugurales », n° 308, 2022, <https://books.openedition.org/cdf/14041>.

COURS ET SÉMINAIRE - ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE ET TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

La Terre baigne dans un océan d'énergie, celle de la lumière du Soleil. De nature extraterrestre, illimitée à notre échelle, celle-ci échappe de fait à la finitude des ressources terrestres. Elle alimente depuis la nuit des temps les rêves de l'humanité d'une

* La chaire Innovation technologique Liliane Bettencourt a été créée en partenariat avec le soutien de la Fondation Bettencourt Schueller.

D. Lincot, « Innovation technologique Liliane Bettencourt », *Annuaire du Collège de France. Résumé des cours et travaux*, 122^e année : 2021-2022, 2025, p. 145-156, <https://journals.openedition.org/annuaire-cdf/20463>.

utilisation universelle et pacifique. La conversion photovoltaïque, grâce aux cellules solaires, permet pour la première fois dans l'histoire la conversion directe de l'énergie des photons en électricité. De sa découverte en 1839 à son formidable essor actuel, cette leçon inaugurale retrace l'histoire de sa longue progression scientifique, technologique et sociale. Pressentie comme le futur pilier de la transition énergétique, l'énergie solaire permet d'envisager le passage d'un Anthropocène destructeur à un Héliocène réparateur.

LEÇON INAUGURALE - ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE ET TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Le 20 janvier 2022

C'est l'énergie que l'on n'attendait pas, celle qui ne pesait pratiquement rien il y a encore une dizaine d'années et que le début du xx^e siècle a vu éclore et se développer de façon exponentielle. Il s'agit de l'énergie solaire photovoltaïque issue de la transformation de la lumière du soleil, portée par les photons, en énergie électrique. Tout cela directement, sans bruit, sans pièces tournantes, sans vapeur, sans consommation de carburant ou de matériaux ni usure, ce qui lui donne un caractère unique, voire magique aux yeux de ses premiers témoins, dans l'éventail des moyens classiques de production d'électricité.

Sa découverte remonte à près de deux siècles, en 1839 précisément, lorsque Edmond Becquerel, au Muséum national d'histoire naturelle, baigné dans le bouillonnement créatif et d'innovations ayant suivi la découverte de l'électricité et de la photographie, chercha à mesurer l'intensité de la lumière par un signal électrique *via* un montage de Volta adapté sous éclairement. Il avait 19 ans.

Il fallut attendre le tournant du siècle pour que de premières cellules solaires voient le jour et que l'effet photoélectrique soit expliqué par Albert Einstein en 1905, et attendre encore cinquante ans pour que naîsse la technologie moderne des cellules au silicium. Avec les développements associés à la conquête spatiale, le photovoltaïque moderne était né. La théorie, issue de la physique quantique, était posée, de nouveaux procédés, de nouveaux matériaux en couches minces émergeaient [GaAs, CdTe, silicium amorphe, Cu(In,Ga)Se₂] tandis que les rendements augmentaient sans cesse, dans un bouillonnement créatif et innovant qui allait en s'amplifiant; c'est encore le cas aujourd'hui, avec la découverte de nouvelles filières issues de la chimie comme le photovoltaïque organique ou les pérovskites. Ce n'est cependant qu'au début de ce siècle que le rêve porté par des générations de scientifiques et d'utopistes de voir le photovoltaïque prendre racine sur Terre se réalise enfin. Grâce à l'impact de politiques publiques de soutien volontaristes, en Allemagne et au Japon en particulier, et aux progrès technologiques, le secteur industriel a pu se mettre en place, d'abord en Europe puis en Chine, consolidant la chaîne de valeur du photovoltaïque et amorçant la réduction des coûts liée au changement d'échelle. Les coûts élevés,

barrière infranchissable, étaient enfin battus en brèche, au point que ceux-ci ont baissé d'un facteur 10 en dix ans et permettent de générer aujourd'hui une électricité compétitive au niveau économique. La progression est telle que l'Agence internationale de l'énergie parle du « roi soleil » pour la qualifier. Le photovoltaïque est de fait devenu la source d'électricité la moins chère au monde.

En parallèle, les capacités de production photovoltaïque explosent au niveau mondial avec des installations annuelles passant de 300 mégawatts en 2000 à 143 gigawatts en 2020, pour une capacité totale s'approchant du seuil symbolique du térawatt. Dans certains pays, dont l'Allemagne, près de 10 % de l'électricité consommée est d'origine photovoltaïque, pour 2,5 % en France.

L'énergie solaire photovoltaïque est ainsi entrée dans la cour des grands pour contribuer à la transition énergétique. L'abondance de la ressource solaire et sa distribution au niveau mondial font que le potentiel de développement et d'accélération est considérable, allant du local, avec les toits des maisons, aux grandes installations terrestres ou maritimes. De nombreuses études prospectives prédisent une contribution très élevée dans le mix énergétique à venir en substitution des énergies fossiles.

Ce développement à grande échelle s'accompagne aussi de questions fondamentales concernant la soutenabilité de cette progression au niveau économique et ses impacts environnementaux et sociaux. Il ne pourra se faire que si la technologie photovoltaïque répond à ces critères et s'accompagne d'une acceptabilité sociale portée par l'adhésion des citoyens, d'un soutien des pouvoirs publics en matière de développement industriel et d'une éthique tournée vers l'engagement dans la lutte contre le changement climatique.

Au-delà des aspects technologiques, scientifiques, de l'analyse approfondie des cycles de vie (ressources, bilan carbone, recyclage, etc.), ce sont donc aussi des éléments culturels, liés à la perception même de la relation de l'humanité avec l'énergie solaire et à la confiance nécessaire, qui détermineront le succès ou non du recours à l'énergie photovoltaïque. Ils stimuleront d'autant plus les efforts de recherche en cours dans les laboratoires du monde entier, en lien aussi avec les problématiques complémentaires de stockage, de production d'hydrogène ou autres « carburants solaires » aptes à palier l'intermittence – heureuse – inhérente à la lumière de notre étoile.

COURS 1 - L'ÉNERGIE SOLAIRE : ANALYSE DE LA RESSOURCE ET DE SES TRANSFORMATIONS

Le 26 janvier 2022

L'énergie solaire, c'est la lumière du soleil, utilisée depuis la nuit des temps. Quelles sont ses caractéristiques ? Combien en reçoit la Terre ? Comment est-elle distribuée en fonction de l'endroit sur la planète, au niveau des terres et des océans ? Combien une toiture, un champ, une ville en reçoivent-ils ? Comment se place cette énergie par rapport à l'énergie consommée par l'humanité ? Comment se transforme-t-elle ?

Autant de questions qui ont été abordées dans cette présentation, laquelle s'est également intéressée aux transformations en formes dérivées comme les énergies éolienne, hydraulique, marine et de biomasse issue de la photosynthèse – laquelle occupe une place particulière, car elle repose sur la conversion photovoltaïque naturelle dont s'inspirent les développements les plus récents de la recherche.

**SÉMINAIRE 1 - LA RESSOURCE SOLAIRE : IMPORTANCE, VARIABILITÉS,
MOYENS DE CARACTÉRISATION ET DE PRÉVISION PAR DES MOYENS
D'OBSERVATION DE LA TERRE**

Philippe Blanc (MINES ParisTech), le 26 janvier 2022

L'éclairement solaire joue un rôle clé dans de nombreux domaines comme la biomasse (agriculture, foresterie), l'océanographie, les mouvements atmosphériques et océaniques, la santé humaine, l'architecture ou encore l'énergie : sa connaissance précise est d'une grande importance. Le point central de ce séminaire concerne son exploitation énergétique : par analogie avec d'autres sources d'énergie, l'éclairement solaire peut être considéré comme un gisement ou une ressource. Le séminaire a pour premier objectif d'identifier les sources de variabilité dans le temps et l'espace de cette ressource en séparant celles, déterministes, découlant de la position astronomique relative entre la Terre et le Soleil, celles liées à l'atmosphère claire (hors nuage) et celles liées à la couverture nuageuse. Dans un deuxième temps, sont présentés les différents moyens d'observation de la Terre pour la caractérisation du rayonnement solaire, du capteur pyranométrique aux modèles numériques météorologiques en passant par le rôle des satellites d'observation. Enfin, le séminaire s'attache à montrer, dans différents cas d'étude concrets, le rôle des sciences de la donnée pour tirer parti des différentes sources d'observation (mesures *in situ*, caméras hémisphériques, images satellites, etc.) afin de répondre aux besoins de l'industrie de l'énergie solaire, de la caractérisation de variabilité de long terme à la prévision intra-horaire en passant par la cartographie solaire à haute résolution.

**COURS 2 - HISTOIRE DES TECHNOLOGIES PHOTOVOLTAÏQUES
(1839-2021) : PRESQUE DEUX SIÈCLES DE DÉCOUVERTES,
D'INNOVATIONS, D'AVENTURES HUMAINES**

Le 2 février 2022

De la découverte de l'effet photovoltaïque par Edmond Becquerel, en 1839, au déploiement du photovoltaïque terrestre au début du XXI^e siècle, se sont succédé des événements marquants dont nous analyserons l'historique et les acteurs dans le contexte de l'époque. Deux périodes sont distinguées, celle de l'incubation, durant près d'un siècle jusqu'à la découverte des cellules au silicium en 1941, puis le développement du photovoltaïque moderne issu de la conquête spatiale et s'appuyant sur les

avancées scientifiques fondamentales, avec la découverte continue de nouveaux matériaux et procédés et l'essor des applications terrestres. Ce cours met en avant le rôle de la recherche et de l'industrie françaises.

SÉMINAIRE 2 - EDMOND BECQUEREL ET L'INNOVATION TECHNOLOGIQUE : LA PHYSIQUE « APPLIQUÉE AUX ARTS ET À L'INDUSTRIE »

Christine Blondel (CNRS), le 2 février 2022

Le nom d'Edmond Becquerel est aujourd'hui associé à la découverte, en 1839, de l'effet photovoltaïque, grâce à la production d'un courant électrique par l'action de la lumière sur un métal recouvert d'un sel d'argent plongé dans un électrolyte. Pour ses contemporains, il fut bien plus que l'auteur de la description de cet effet alors sans interprétation et sans application énergétique. C'est dans le contexte de la naissance de la photographie que Becquerel construisit l'appareil qui utilisait cet effet destiné à préciser l'action chimique de la lumière. Ses qualités d'expérimentateur en électricité et sur les propriétés de la lumière, d'inventeur d'instruments, de passeur entre la physique, la chimie, la météorologie et la médecine, et enfin son implication dans ce qu'on appelle à l'époque « les applications de la physique aux arts et à l'industrie » permettent de mettre en avant le rôle, au XIX^e siècle, de la physique expérimentale et de l'industrie de précision dans l'innovation technologique.

COURS 3 - L'ESSOR DU PHOTOVOLTAÏQUE MODERNE : ASPECTS FONDAMENTAUX DE LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

Le 9 février 2022

Avec le photovoltaïque, l'humanité a eu accès pour la première fois à un moyen de production d'énergie électrique ne faisant pas appel à des pièces tournantes et au cycle thermique à vapeur. Cela a été rendu possible par la découverte des propriétés semi-conductrices de certains matériaux comme le silicium et de dispositifs à base de jonction p-n, les cellules photovoltaïques, permettant de convertir directement l'énergie des photons en électricité. Nous rappelons les théories issues de la physique du solide et de la physique quantique permettant d'expliquer le fonctionnement des cellules et les principales caractéristiques photovoltaïques qui en résultent (création d'un photo-courant et d'une photo-tension). Nous présentons également les rendements théoriques maximum, de 33 % pour une simple jonction à près de 85 % pour des dispositifs comme les multijonctions, ainsi que de nouveaux concepts qui font l'objet de nombreuses recherches. Ces derniers sont comparés avec les caractéristiques des dispositifs actuels.

SÉMINAIRE 3 - À LA RECHERCHE DES PERFORMANCES ULTIMES POUR LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

Jean-François Guillemoles (CNRS), le 9 février 2022

Le photovoltaïque possède un très grand potentiel, non seulement du fait de la ressource qu'il utilise, mais aussi du fait que les performances des systèmes actuels, en dépit des impressionnantes progrès réalisés ces dernières décennies, restent encore très loin des performances théoriquement prédictes. Un premier exemple est donné par l'écart entre les rendements des dispositifs commerciaux, de l'ordre de 25 %, ceux des meilleurs dispositifs en laboratoire (47 %) et ceux donnés par la théorie (93,3 %).

On peut tout d'abord essayer de comprendre ce qui limite les rendements des différents dispositifs en revisitant les bases de la théorie de la conversion photovoltaïque : en partant de la thermodynamique du rayonnement électromagnétique d'abord, puis en considérant des modèles plus spécifiques comme ceux inspirés par la théorie de Shockley-Queisser. On peut ensuite étudier les différentes options qui ont été proposées pour aller au-delà des dispositifs actuels : multijonctions, mais aussi approches alternatives telles que cellules à porteurs chauds, à bande intermédiaire, à conversion de photon, etc., qui toutes ont le potentiel de s'approcher des limites ultimes de rendement.

Un autre axe d'amélioration des performances est donné par la quantité de matériau actif nécessaire pour obtenir une capacité de conversion d'énergie solaire donnée dans des conditions standard de fonctionnement. Grâce aux progrès de la photovoltaïque, il a été possible de reculer considérablement les limites théoriques et expérimentales sur ce point également.

Des résultats expérimentaux et des preuves de concept existent sur les deux axes d'amélioration présentés.

COURS 4 - LA TECHNOLOGIE SILICIUM CRISTALLIN

Le 16 février 2022

La technologie au silicium cristallin représente aujourd'hui près de 95 % du marché mondial du photovoltaïque (143 gigawatts en 2020). Elle est basée sur l'utilisation de plaquettes de silicium (*wafers*) de 150 à 200 microns, découpées dans des lingots de grande taille qui connaissent ensuite différentes étapes de transformation (diffusion, passivation, contacts, etc.) afin de réaliser des cellules complètes dont le rendement record atteint aujourd'hui 26,7 % (267 watts par mètre carré), proche du rendement théorique pour le silicium (29 %). Nous présentons les technologies et procédés qui ont mené à ce résultat remarquable, en particulier les ruptures scientifiques et technologiques associées. On assiste actuellement à un foisonnement des technologies, PERC (contacts passivés), HIT (hétérojonction), IBC (contacts arrière

interdigités) et de nouvelles pistes d'amélioration qui font l'objet de recherches intenses. Les questions de cycle de vie sont également abordées.

SÉMINAIRE 4 - TREnte ANS D'ÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES ET INDUSTRIELLES DES CELLULES SOLAIRES À BASE DE SILICIUM CRISTALLIN

Étienne Drahi (TotalEnergies, IPVF), le 16 février 2022

La technologie photovoltaïque à base de silicium cristallin a vu réduire son coût de plus de 99 % depuis 1976 (de > 70 \$/Wp à moins de 0,21 \$/Wp en 2020 selon l'ITRPV). Étrangement, entre 1989 et 1994, des cellules solaires avec des rendements de conversion de plus de 24 %, dont l'architecture est très proche des cellules solaires PERC qui dominent aujourd'hui le marché du photovoltaïque, étaient déjà fabriquées à l'université de Nouvelle-Galles du Sud (UNSW). L'amélioration des performances et des coûts du PV n'est donc pas strictement liée à l'architecture des cellules solaires, mais surtout au choix des matériaux les plus adéquats et au déploiement de procédés de fabrication compatibles avec l'industrialisation. Pour cela, un lien très fort entre recherche et industrie est essentiel ainsi qu'un esprit « ouvert » afin de s'inspirer des autres technologies et domaines applicatifs (microélectronique, électronique grande surface, OLEDs, etc.) Ce séminaire retrace certaines des évolutions technologiques majeures des trente dernières années dans le domaine du silicium cristallin industriel et les relie avec les enjeux futurs de la filière c-Si.

COURS 5 - LES TECHNOLOGIES COUCHES MINCES (ASI, CDTE, CIGS, GAAS)

Le 23 février 2022

Les technologies couches minces se distinguent par la capacité des matériaux à absorber la lumière solaire sur des épaisseurs très faibles, de l'ordre de quelques microns ou moins, au lieu de plus d'une centaine ou plus pour le silicium. Cela résulte d'une différence dans la structure électronique des matériaux, permettant une absorption respectivement directe ou indirecte des photons. La conséquence est un changement fondamental dans le mode de préparation, passant d'un procédé de découpe pour le silicium à des procédés de revêtement pour les couches minces, qui peuvent se faire sous vide, sous atmosphère ou en solution, et conduire à une amélioration très importante en matière de coût de fabrication et de capacités de production. Nous présentons dans ce cours les filières couches minces, qui ont atteint la maturité industrielle et commerciale (aSi, CdTe, CIGS), en nous attachant à montrer les évolutions spectaculaires dans la physicochimie des matériaux et des procédés qui leur ont permis de s'imposer, ainsi que les développements les plus récents en matière de recherche et d'applications, en particulier la quête du photovoltaïque ultraléger, flexible et à très haut rendement.

**SÉMINAIRE 5 - PROCÉDÉS PLASMA À BASSE TEMPÉRATURE
POUR LE DÉPÔT DE COUCHES MINCES DE SILICIUM :
DE L'AMORPHE AU CRISTALLIN**

Pere Roca i Cabarrocas (CNRS, IPVF), le 23 février 2022

Les procédés plasma permettent le dépôt d'une grande variété de matériaux dans des conditions hors équilibre. Nous retracons ici l'évolution de la filière couches minces de silicium : depuis le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) dans les années 1980 jusqu'au silicium polymorphe et au nano- et micro-cristallin, sans oublier ses alliages respectifs avec du carbone, du germanium et de l'oxygène qui ont donné lieu à une ingénierie de bande interdite et à la fabrication de cellules tandem et triple jonction, permettant un développement spectaculaire de l'électronique sur de grandes surfaces, en particulier avec les écrans plats. La quête de rendement a poussé la filière à s'intéresser aux cellules à jonction radiale et au dépôt de couches minces de a-Si:H sur du silicium cristallin pour la réalisation de cellules dites « à hétérojonction », qui détiennent le record de rendement en ce qui concerne la technologie à base de silicium cristallin. Nous esquissons également des pistes pour l'avenir de cette filière : l'élaboration de couches de silicium cristallin épitaxiées à 200 °C, qui ouvrent la voie à des cellules cristallines minces et flexibles. Qui plus est, cette épitaxie basse température a aussi été démontrée sur du GaAs, ce qui permet la réalisation de cellules tandem c-Si/GaAs.

**COURS 6 - TECHNOLOGIES ÉMERGENTES ET NOUVEAUX CONCEPTS
(MULTIJONCTIONS, PÉROVSKITES, ORGANIQUE,
PHOTO-ÉLECTROCHIMIE)**

Le 2 mars 2022

Contrairement à ce que l'on aurait pu attendre, le développement du photovoltaïque se traduit par un dynamisme exceptionnel en matière de recherches fondamentales sur nouveaux matériaux, de nouveaux concepts, de nouvelles architectures susceptibles de bouleverser les technologies établies dans les prochaines années. Les objectifs portent à la fois sur l'augmentation des performances mais aussi l'amélioration de l'impact environnemental et écologique. Dans ce cours, nous présentons l'éventail de ces nouvelles approches et deux filières, issues de la chimie, retiennent plus particulièrement notre attention, car elles révolutionnent l'approche classique des matériaux inorganiques : d'une part, la filière du photovoltaïque organique (pendant des OLED pour l'affichage), qui s'appuie sur l'immense variété des molécules et polymères organiques, dont les emblématiques fullerènes, et dont le développement commercial est amorcé. D'autre part, la filière pérovskite, basée sur un matériau hybride organique-inorganique à base de méthylammonium iodure de plomb, qui, en seulement quelques années, atteint des sommets en matière de rendement, suscitant d'immenses espoirs au sein de la communauté des chercheurs. Les défis à relever

sont nombreux, allant de la compréhension des propriétés fondamentales des matériaux et des interfaces à l'optimisation des procédés de fabrication, ou encore la maîtrise des phénomènes de vieillissement et d'augmentation des surfaces. Néanmoins l'innovation industrielle est lancée, avec de premières unités de fabrication en cours de construction. Le graal serait en fait d'un autre ordre, celui de coupler la technologie pérovskite avec la technologie silicium cristallin ou CIGS pour la fabrication de cellules tandem permettant une rupture fondamentale dans le rendement théorique de 29 % à plus de 40 %. Des modules commerciaux à plus de 30 % sont attendus en 2030. Enfin, les recherches basées sur la photo-électrochimie visant la production directe d'hydrogène ou la réduction du CO₂ se développent et suscitent également de grands espoirs.

SÉMINAIRE 6 - LES PÉROVSKITES HYBRIDES HALOGÉNÉES : DE NOUVEAUX SEMI-CONDUCTEURS ADAPTÉS AUX DÉFIS DU PHOTOVOLTAÏQUE

Emmanuelle Deleporte (ENS), le 2 mars 2022

Les pérovskites hybrides halogénées, étudiées de façon marginale dès la fin des années 1990, notamment pour leurs propriétés d'émission de lumière, ont émergé de façon spectaculaire il y a une dizaine d'années dans le contexte du photovoltaïque. Avec des rendements de conversion de la lumière solaire rejoignant aujourd'hui ceux du silicium, ces matériaux ont ouvert de nouvelles potentialités pour la conception des cellules solaires.

Les propriétés physiques particulières du matériau sont à la base de ce succès fulgurant. Les études fondamentales du matériau révèlent que les pérovskites hybrides halogénées possèdent un ensemble de propriétés favorables pour le photovoltaïque, rarement présentes en même temps dans les autres types de matériaux : un grand coefficient d'absorption, des effets excitoniques faibles, une énergie de bande interdite permettant une bonne collection des photons venant du Soleil, de bonnes propriétés de transport, une grande tolérance aux défauts. De plus, ces propriétés physiques peuvent être modulées par ingénierie chimique, ce qui permet d'optimiser les pérovskites pour les adapter aux différents défis du photovoltaïque tels que la stabilité ou la réalisation de cellules multijonctions.

COURS 7 - DE LA CELLULE AUX SYSTÈMES

Le 9 mars 2022

En vue des applications, les cellules photovoltaïques doivent être intégrées dans des systèmes complets optimisés en fonction des spécificités recherchées, et ceci dans le souci de la performance du système, de son coût et de ses caractéristiques environnementales. Les cellules sont d'abord intégrées, en série et en parallèle, dans

des modules permettant de standardiser la puissance délivrée sous une tension et un courant donnés. Les modules sont ensuite interconnectés sous forme de chaînes de puissance supérieure, et reliés à un poste d'optimisation de puissance avant leur conversion en courant alternatif pour injection sur le réseau, alimentation directe ou stockage. Un système photovoltaïque est donc un système complexe mettant en œuvre des fonctions électriques de haute technologie ainsi que des systèmes de suivi, de commande et de pilotage de plus en plus liés à Internet. Nous présentons les différents éléments constitutifs des systèmes actuels et leur évolution en vue de les adapter à différents environnements (toitures, fermes solaires, photovoltaïque flottant, agri-photovoltaïque, systèmes autonomes, etc.). Nous traitons en outre de l'émergence des synergies entre les systèmes photovoltaïques, le réseau électrique, le stockage (batteries et hydrogène), la mobilité électrique et Internet dans la continuité de la vision présentée par Jeremy Rifkin.

SÉMINAIRE 7 - ARCHITECTURE, FIABILITÉ ET ÉVOLUTIONS DES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES

Anne Migan-Dubois (Institut polytechnique de Paris, E4C, IPVF), le 9 mars 2022

La cellule photovoltaïque est le dispositif de base de la conversion photoélectrique. Comment, à partir de cette cellule, obtient-on des modules? Quels sont les autres composants nécessaires à la production d'électricité dans une centrale photovoltaïque? Comment redonner confiance et convaincre de la fiabilité de ces centrales? Une centrale photovoltaïque est-elle un moyen de production durable? Ce séminaire donne des éléments de réponse à ces quatre questions. Nous y expliquons comment associer des cellules pour constituer un module, et nous présentons les autres composants nécessaires à la production d'électricité ainsi que les différentes topologies des systèmes. La deuxième partie du cours est consacrée à la présentation des principaux défauts, de leurs impacts sur la production et des méthodes de diagnostic qui peuvent être mises en place pour les détecter, dès leur apparition, dans des centrales photovoltaïques en fonctionnement. Pour terminer, quelques notions et exemples d'analyse de cycle de vie sont présentés afin d'ouvrir la discussion sur la soutenabilité des centrales photovoltaïques.

COURS 8 - PHOTOVOLTAÏQUE ET TRANSITION ÉNERGÉTIQUE. VISIONS À DIX ANS, TRENTÉ ANS

Le 16 mars 2022

Ce cours aborde le développement du photovoltaïque dans la société et sa capacité à répondre massivement et rapidement à la transition énergétique mondiale tout en respectant les critères environnementaux, économiques et éthiques indispensables à la lutte contre le changement climatique et la préservation de la Nature. Si la res-

source solaire est largement suffisante pour répondre de façon majeure à la demande énergétique mondiale, une question fondamentale reste posée : celle des ressources en matériaux nécessaires, des conditions de leur extraction, de leur conditionnement, de leur recyclage, de même que les bilans en énergie grise, carbone, qui doivent être traités rigoureusement dans le cadre des analyses de cycle de vie, en fonction des technologies et des applications. La présentation fait le point sur la situation actuelle et les recherches en cours. Différents scénarios de développement du photovoltaïque issus de la littérature y sont présentés. Est également évoquée une tentative de prospective à moyen terme et long terme des technologies photovoltaïques et des applications nouvelles, comme le photovoltaïque saisonnier (rétractable) terrestre ou aérien (voire spatial). Enfin, nous abordons la question des enjeux environnementaux et industriels, et celle de l'émergence de modèles économiques innovants (faisant appel aux initiatives et collectifs citoyens et aux politiques publiques).

SÉMINAIRE 8 - LE FUTUR À LA LUMIÈRE DES EXPÉRIENCES ET DES ÉVOLUTIONS ACTUELLES SUR LE PLAN LOCAL

André Joffre (TECSOL, BPCE), le 16 mars 2022

Le séminaire s'est appuyé sur l'expérience d'André Joffre, créateur du bureau d'études TECSOL fondé il y a une quarantaine d'années à Perpignan, comme acteur et témoin privilégié des développements de l'énergie solaire au niveau local puis national. André Joffre a analysé la croissance du marché du photovoltaïque au niveau international avec un focus sur la situation en France, en rappelant en particulier le contexte politique du lancement des tarifs d'achat en 2006 ainsi que les objectifs à 2050 visant à atteindre 150 gigawatts. La présentation s'est ensuite attachée à étudier comment se traduit au niveau local le développement du photovoltaïque. L'électricité produite comporte de plus en plus une part d'autoconsommation, soit individuelle, soit collective, avec la perspective de développement des communautés d'énergie renouvelable à l'échelle d'un quartier ou d'une ville. Les types d'installations sont également très variés (milieu urbain, centrales au sol, agrivoltaïque, etc.). Les convergences avec d'autres secteurs ont été abordées, comme la flexibilité en lien avec le réseau, le stockage avec les véhicules électriques, la production d'hydrogène ou l'intégration du numérique, ouvrant de larges perspectives pour l'avenir.

COLLOQUE - ÉNERGIE SOLAIRE ET SOCIÉTÉ

Le 21 avril 2022

Avec l'avènement de la société industrielle basée sur l'abondance énergétique issue des ressources fossiles, la relation entre la société et l'énergie solaire a profondément

changé. De ressource indispensable, incontournable, avec l'énergie éolienne, hydraulique ou la biomasse issue de la photosynthèse, elle est devenue secondaire, donnant à l'humanité l'illusion de s'être affranchie définitivement des contraintes de la nature et de ses énergies qualifiées de « sauvages ».

Avec la crise climatique et l'épuisement des ressources fossiles, le retour à la réalité s'est imposé, qui nous oblige à trouver des solutions urgentes. L'énergie solaire et les énergies renouvelables qui en dérivent deviennent à nouveau un recours, d'autant plus que de nouvelles formes de transformation très efficaces ont été développées avec le photovoltaïque et l'éolien dont le potentiel est suffisant pour contribuer de façon décisive à la transition énergétique.

Pourtant, les énergies renouvelables restent largement décriées et font souvent l'objet de déni. Il y a là, au-delà des questions scientifiques et technologiques, une question plus profonde, de nature culturelle et philosophique, qui touche à la relation présente et à venir de la société avec l'énergie solaire et la nature en général. La société évoluera-t-elle vers un recours harmonieux et éthique à l'énergie solaire, s'appuyant sur le progrès scientifique et technologique, ou bien tardera-t-elle encore à s'engager résolument dans cette voie ?

L'objectif du colloque, dans un contexte marqué par les débats très vifs sur le futur énergétique, était de susciter une réflexion sur la place de l'énergie solaire dans la société future, en associant les aspects scientifiques, technologiques et économiques aux aspects sociaux, environnementaux et culturels, qui seront au cœur du succès des développements à venir dans nos milieux urbains et nos cadres de vie. Ces questions ont fait l'objet de plusieurs sessions et tables rondes thématiques rassemblant des intervenants spécialistes des différents domaines.