

# LES ÉNERGIES RENOUVELABLES AU SERVICE DE L'HUMANITÉ

40<sup>e</sup> anniversaire du congrès « Le soleil au service de l'homme »  
1973 - 2013



## ENJEUX ACTUELS ET PERSPECTIVES AUX HORIZONS 2030 ET 2050

En partenariat avec :



La réalisation de ce document a été coordonnée par :  
Dominique Campana, Marie D'Adesky,  
Christine Bolinches et Laurent Caillierez de l'ADEME  
Alain Dollet et Daniel Lincot du CNRS  
Osman Benchikh de l'UNESCO

# P R É F A C E

Placés sous le Haut Patronage du Président de la République française, se sont déroulés à Paris le 3 octobre 2013, le colloque scientifique international « Les énergies renouvelables au service de l'humanité » et la cérémonie qui célébrait le 40<sup>e</sup> anniversaire du premier congrès international « Le soleil au service de l'homme », tenue à l'UNESCO en 1973.

Cet évènement a voulu marquer les progrès accomplis depuis 40 ans dans le développement des énergies renouvelables, mais aussi les défis énergétiques et climatiques à relever avant l'échéance de 2050. C'est en effet à cet horizon que nous devons avoir réussi à diviser par quatre nos émissions actuelles de gaz à effet de serre (GES) afin de limiter le réchauffement climatique d'origine anthropique à 2 °C.

Pour la première fois en 1973, près de 900 scientifiques se sont réunis pour lancer une initiative visant à promouvoir la recherche sur l'énergie solaire, conscients que le développement de cette énergie renouvelable inépuisable pourrait contribuer fortement au bien-être futur de l'humanité.

Les quarante ans qui se sont écoulés et surtout ces dernières années, ont largement donné raison à ces précurseurs. Les énergies renouvelables ont en effet connu un essor extraordinaire, qu'il s'agisse du solaire, en particulier photovoltaïque, mais aussi de l'éolien, ou encore de la biomasse. L'Agence Internationale de l'Energie (AIE) estime que les énergies renouvelables représenteront près d'un tiers de la production mondiale d'électricité d'ici à 2035.

Animés par la même ambition universaliste que lors du Congrès de 1973, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et l'Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) ont co-organisé ces rencontres internationales sur les enjeux actuels et perspectives des énergies renouvelables aux horizons 2030 et 2050.

Des experts de haut niveau et des représentants d'organisations internationales ont échangé sur les aspects scientifiques, techniques, politiques, économiques et sociaux des différentes filières des énergies renouvelables à l'échelle mondiale. Il s'agissait de faire le bilan du développement des énergies renouvelables, de mettre en perspective leur contribution dans la transition énergétique mondiale et d'appeler à une solidarité internationale renforcée.

Les actes de cet évènement reprennent les interventions des différents orateurs, complétées par des contributions écrites additionnelles sur les énergies renouvelables dans le monde.

Nous espérons que ces travaux puissent participer à la réussite des objectifs de l'initiative des Nations Unies « Énergie durable pour tous » (SE4ALL) qui consistent à assurer un accès universel aux services énergétiques modernes, doubler la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique global et doubler le taux global d'amélioration de l'efficacité énergétique à l'horizon 2030 ; objectifs qui constituent sans doute l'un de plus grands et des plus beaux défis du XXI<sup>e</sup> siècle.

## I. COLLOQUE INTERNATIONAL

<b>Discours d'ouverture</b> .....	<b>10</b>
Joël BERTRAND.....	10
<i>Directeur Général délégué à la science du CNRS</i>	
Virginie SCHWARZ.....	11
<i>Directrice Générale Déléguée de l'ADEME</i>	
Gretchen KALONJI.....	13
<i>Sous-Directrice générale pour les sciences exactes et naturelles, UNESCO</i>	
<b>Introduction</b>	
<b>Les énergies renouvelables dans le monde</b> .....	<b>15</b>
<b>Retour sur 40 ans d'expérience</b> .....	<b>15</b>
Wolfgang PALZ	
<i>Président du Conseil Mondial des Energies Renouvelables</i>	
<b>La situation mondiale des énergies renouvelables</b> .....	<b>16</b>
Christine LINS	
<i>Secrétaire exécutive de REN21</i>	
<b>Les Perspectives mondiales des Énergies renouvelables aux horizons 2030 et 2050</b> .....	<b>19</b>
Paolo FRANKL	
<i>Chef de la Division Énergies renouvelables, Agence Internationale de l'Energie (AIE)</i>	
<b>les Nouvelles perspectives des Énergies renouvelables</b> .....	<b>22</b>
Frank WOUTERS	
<i>Directeur général adjoint de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA)</i>	
<b>Session I - Partie I</b>	
<b>Quels développements scientifiques et techniques des énergies renouvelables et quelles perspectives pour les filières industrielles aux horizons 2030 et 2050 ? - Energies solaires et éoliennes</b> .....	<b>25</b>
Daniel LINCOT.....	25
<i>Directeur de recherche au CNRS</i>	
<b>La filière silicium</b> .....	<b>25</b>
Richard SWANSON	
<i>Fondateur de Sunpower, États-Unis</i>	
<b>Les filières couches minces</b> .....	<b>27</b>
Dr Ayodhya TIWARI	
<i>Laboratoire des couches minces et photovoltaïque de l'Empa (Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche) de Zurich, en Suisse</i>	
<b>Le photovoltaïque à très haute concentration</b> .....	<b>29</b>
Masafumi YAMAGUCHI	
<i>Directeur, Toyota Technology Institute, Japon</i>	
<b>Le solaire thermodynamique</b> .....	<b>30</b>
Gilles FLAMANT	
<i>Directeur du laboratoire PROMES, CNRS, Odeillo, France</i>	
<b>Energie éolienne au Danemark et transfert de technologie</b> .....	<b>31</b>
Preben MAEGAARD	
<i>Directeur du Folkecenter for Renewable Energy, Danemark</i>	
<b>La feuille de route R&amp;D pour l'éolien à l'horizon 2030/2050 en Europe</b> .....	<b>33</b>
Georges KARINIOTAKIS	
<i>Centre PERSEE, Mines Paristech, France</i>	
<b>Session I - Partie 2</b>	
<b>Quels développements scientifiques et techniques des énergies renouvelables et quelles perspectives pour les filières industrielles aux horizons 2030 et 2050 ? - Biomasse, énergies marines et géothermie</b> .....	<b>37</b>
Alain DOLLET.....	37
<i>Directeur de recherche au CNRS pour la cellule Énergie</i>	

<b>Les énergies de la biomasse : efficacité, sobriété, diversité</b> .....	37
Claude ROY <i>Président du Club des Bio-économistes et membre du Conseil Général de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Espaces Ruraux (CGAAER)</i>	
<b>Le succès des bioénergies alimentées par le soleil au Brésil</b> .....	41
Caroline RAYOL <i>Chef de Projet Bioénergies et Ressources, Pôle de compétitivité Industries et Agro-Ressources</i>	
<b>Les avancées majeures dans le domaine des biocarburants</b> .....	43
Jean-Luc DUPLAN <i>Responsable Biomasse, IFP Énergies nouvelles (IFPEN)</i>	
<b>Le développement des énergies marines renouvelables en France</b> .....	44
Marc BOEUF <i>Directeur R&amp;D, France Energies Marines</i>	
<b>Énergies géothermiques en Europe</b> .....	46
Burkard SANNER <i>Président « European Geothermal Energy Council » (EGEC)</i>	
<b>Présentation du secteur géothermique en France, cas de la région Alsace</b> .....	49
Jean-Jacques GRAFF <i>Président de Électricité de Strasbourg Géothermie (ESG)</i>	
<b>Prospectives pour 2030/2050, au-delà des déploiements technologiques</b> .....	51
Anne VARET <i>Directrice Recherche et Prospective de l'ADEME</i>	
<b>Session II</b>	
<b>Comment lever les verrous au déploiement des énergies renouvelables ?</b> .....	53
Rémi CHABRILLAT <i>Directeur Productions et Énergies Durables de l'ADEME</i>	
<b>Intégration des Énergies renouvelables au réseau : enjeux technologiques, économiques et organisationnels des réseaux électriques intelligents</b> .....	53
Nouredine HADJSAID <i>Professeur à l'INP Grenoble, laboratoire G2ELAB, CNRS</i>	
<b>Stockage de l'électricité : cas du stockage électrochimique</b> .....	56
Jean-Marie TARASCON <i>Professeur à l'université de Picardie, Directeur du Réseau sur le stockage Electrochimique de l'énergie (RS2E), membre de l'Académie française des Sciences</i>	
<b>Stockage de l'hydrogène et piles à combustible</b> .....	58
Thierry PRIEM <i>Responsable Programme Hydrogène et Piles à Combustible au Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Énergies Nouvelles et les Nanomatériaux, CEA/LITEN (France)</i>	
<b>Matières premières et métaux stratégiques</b> .....	59
Olivier VIDAL, <i>Directeur de recherche au CNRS, Coordinateur du programme européen ERA-MIN</i>	
<b>Cas de l'Allemagne</b> .....	61
Franz ALT <i>Journaliste, spécialiste des énergies renouvelables, Allemagne</i>	
<b>Cas de la France</b> .....	63
Jean-Louis BAL, <i>Président du Syndicat des Énergies Renouvelables (SER)</i>	
<b>Session III</b>	
<b>Comment favoriser les conditions du déploiement futur des énergies renouvelables pour un accès universel à l'énergie ?</b> .....	65
Dominique CAMPANA <i>Directrice de l'Action internationale de l'ADEME</i>	
<b>Expérience du PNUE dans le déploiement des énergies renouvelables et des technologies sobres en carbone dans les pays en développement</b> .....	66
Dr Zitouni OULD-DADA <i>Directeur de l'Unité Technologie, Branche Énergie de la Division Technologie, Industrie et Économie (DTIE) du PNUE.</i>	

<b>Le Programme régional du Centre pour les Energies Renouvelables et l'Efficacité Energétique de la CEDEAO</b> .....	67
Mahama KAPPIAH <i>Directeur exécutif du Centre pour les Energies Renouvelables et l'Efficacité Energétique (ECREEE) de la CEDEAO</i>	
<b>Les Perspectives des énergies renouvelables dans les pays méditerranéens</b> ...	70
Houda ALLAL <i>Directrice générale de l'Observatoire Méditerranéen de l'Énergie (OME)</i>	
<b>Les mécanismes de financement des énergies renouvelables</b> .....	72
Michael ECKHART <i>Directeur Général, Citigroup, États-Unis</i>	
<b>Les programmes de soutien au déploiement des énergies renouvelables dans les pays en développement</b> .....	76
Christian de GROMARD <i>Chef de projet énergie, Division Transport et Energie Durables à l'AFD</i>	
<b>Session IV</b>	
<b>Synthèse et propositions</b> .....	80
Osman BENCHIKH .....	80
<i>Responsable du Programme Énergies Renouvelables, UNESCO</i>	
François MOISAN .....	82
<i>Directeur exécutif Stratégie, Recherche et International, ADEME</i>	
Jean-Yves MARZIN, .....	83
<i>Directeur de l'Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes du CNRS</i>	

## II. CÉRÉMONIE ANNIVERSAIRE

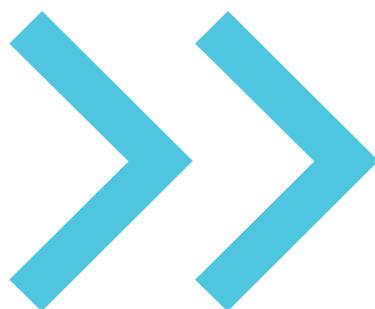
Marie Hélène AUBERT .....	88
<i>Conseillère pour les négociations internationales climat et environnement du Président de la République.</i>	
Gretchen KALONJI .....	90
<i>Sous-Directrice générale pour les sciences exactes et naturelles</i>	
Jean-Yves MARZIN .....	91
<i>Directeur de l'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes (CNRS)</i>	
Bruno LECHEVIN .....	93
<i>Président de l'ADEME</i>	
Wolfgang PALZ .....	95
<i>Président du Conseil Mondial des Energies Renouvelables 95</i>	
Kandeh K. YUMKELLA .....	96
<i>Représentant spécial du Secrétaire Général des Nations Unies et Chef exécutif de l'initiative Énergie durable pour tous, Sous-Secrétaire Général des Nations Unies</i>	
Brice LALONDE .....	98
<i>Conseiller spécial pour le développement durable auprès du Pacte Mondial des Nations Unies</i>	

## III. CONTRIBUTIONS ADDITIONNELLES

Document d'orientation du CEA sur les énergies renouvelables.....	104
L'approche géographique, climatique et systémique de la Commission Energie et Changement Climatique .....	106
L'innovation photovoltaïque et les applications de Bluenergy .....	108
L'énergie géothermique en Europe, European Geothermal Energy Council .....	109

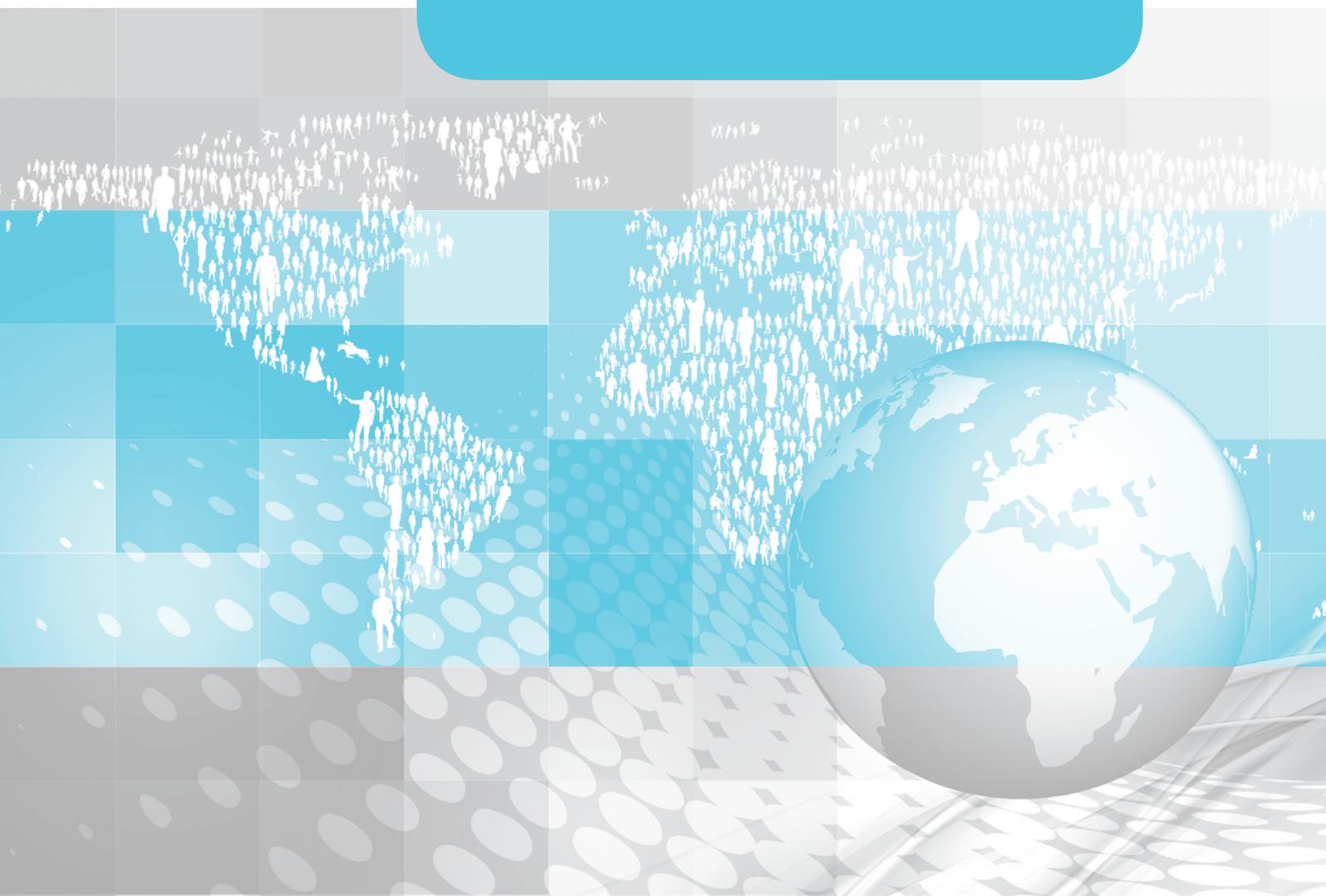
Perspectives de production de carburants à partir de la biomasse, IFPEN France.....	111
Stockage de l'hydrogène et piles à combustible, CEA-Liten, France .....	114
De l'intégration socio-technique des énergies renouvelables à leur acceptabilité sociale, CNRS.....	116
Le statut des énergies renouvelables dans le monde en 2013 .....	118
La géothermie profonde, CNRS, GEIE et ES Géothermie .....	121
Développement des énergies renouvelables en Chine, AECEA .....	124
Les technologies énergétiques propres en Inde, Ecole des études sur l'énergie, Université de Jadavpur .....	127
L'énergie solaire photovoltaïque au Chili, Université pontificale catholique, Valparaíso et CORFO .....	129
<b>BIOGRAPHIES</b> .....	<b>133</b>





- | -

# Colloque international



## DISCOURS D'OUVERTURE

**Joël BERTRAND***Directeur Général délégué à la science du CNRS*

Chers collègues, je voudrais vous dire que nous sommes simplement heureux et fiers de vous accueillir ici au siège du CNRS pour cette journée d'étude intitulée : « Les énergies renouvelables au service de l'humanité, enjeux actuels et perspectives aux horizons 2030 et 2050 ». Je remercie et je félicite les organisateurs pour ce titre qui a déjà fait beaucoup parler des collègues assez peu avertis de ces questions.



Crédit photo © CNRS

Avant de revenir sur les objectifs, sur la genèse de cette journée d'étude, je voudrais remercier nos deux grands partenaires : l'ADEME, représentée ici par sa directrice générale Mme Virginie Schwartz, et l'UNESCO, représentée par Mme Gretchen Kalonji, qui se sont mobilisés pour préparer cette journée importante pour nous.

Je voudrais aussi adresser nos remerciements à l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), à l'Agence Internationale pour les énergies renouvelables (IRENA), à REN21, au Syndicat des Energies Renouvelables (SER), et au Centre pour les Energies Renouvelables et l'Efficacité Energétique (ECREEE) de la Communauté Economique des États de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO), etc. D'ailleurs, nous avons prévu de lancer au CNRS une initiative avec nos collègues de l'Afrique de l'Ouest avant la fin de cet automne.

Il y a 40 ans, l'UNESCO accueillait dans ses locaux le premier grand congrès international : « Le soleil au service de l'homme », qui a réuni plus de 1000 participants issus de plus de 60 pays. Il s'agissait alors de faire l'état des connaissances sur les énergies solaires. Le CNRS, deux ans plus tard, lançait son premier programme interdisciplinaire de recherche qui s'appelait le PIRDES, le Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Energie Solaire.

Si vous deviez retenir, chers collègues qui n'appartenez pas à notre organisme, simplement une chose du CNRS aujourd'hui, c'est que c'est un organisme de recherche pluri et interdisciplinaire. Et le premier objet qui nous a rassemblés, qui a rassemblé toutes les compétences, toutes les expertises, tout le savoir-faire du CNRS, c'est l'énergie solaire.

Lors du congrès de 1973 à l'UNESCO, certains de nos collègues avaient fait des conférences extrêmement remarquées, je pense par exemple à la conférence intitulée : « Etat et perspectives de développement de l'énergie photovoltaïque en France », qui annonçait tous nos grands débats. C'était donc déjà un congrès pluridisciplinaire important pour nous.

D'autres événements ont bien-sûr été organisés depuis, et vous savez bien que les énergies renouvelables sont un grand sujet de débat. Chaque semaine, chaque jour, nous parlons de problèmes d'énergie, d'énergies renouvelables, de la fin programmée et annoncée des énergies fossiles. Bref, le terme d'énergies renouvelables est entré dans notre culture à tous.

Les communautés scientifiques engagées dans l'Energie, comme celles qui sont réunies au sein de l'ANCRE (Alliance Nationale de Coordination de la Recherche en Energie) et bien d'autres, réfléchissent à des solutions qui permettraient d'atteindre ce qu'on appelle le Facteur 4, pour qu'en 2050 nous ayons réellement réduit nos émissions de gaz à effet de serre.

Il s'agit depuis longtemps d'une préoccupation très importante pour nous, et je rappelle que nous avons créé il y a de cela plus de 40 ans, le premier laboratoire entièrement dédié à la recherche sur l'énergie solaire en France. Ce laboratoire qui a changé plusieurs fois de nom est connu pour son grand four solaire; il est situé à Odeillo, une petite commune des Pyrénées Orientales qui est l'une des plus ensoleillées de France. Cette création a marqué le début de notre effort de recherche dans le domaine de l'énergie solaire, et pas seulement le photovoltaïque, puis plus largement dans le domaine des énergies renouvelables.

J'aimerais simplement faire une courte digression pour évoquer la mission et les valeurs du CNRS. Notre organisme de recherche est un organisme de grande taille, cette taille est un héritage qui date d'avant la Seconde Guerre Mondiale et qui nous impose des missions particulières. Nous devons ainsi nous efforcer d'apporter des réponses, en engageant les travaux de recherche nécessaires, aux questions que nous posent nos concitoyennes et nos concitoyens, et cela bien au-delà de nos frontières.

En effet, vous le savez bien, la recherche est une activité internationale. Il n'y a pas de recherche de deuxième catégorie, il n'y a que de la recherche internationale. Nous devons apporter cette valeur avec les universités et avec les autres organismes avec lesquels nous collaborons dans différents programmes, par exemple au sein de l'Alliance ANCRE pour les questions qui touchent à l'énergie et notamment aux énergies renouvelables.

Dans nos unités de recherche, le nombre de chercheurs du CNRS qui sont engagés dans la thématique des énergies renouvelables ou dans des thématiques connexes telles que le stockage ou les réseaux, est supérieur à 800 équivalents temps plein, c'est considérable. Si l'on prend en compte, parce que nous devons le faire, la contribution de nos collègues universitaires, nous devons multiplier ce chiffre par trois. Globalement, l'effort annuel de R&D publics de notre pays dans ce domaine est de l'ordre de 300 millions d'euros, il est vital. Il est indispensable que

cet effort de recherche que fait le pays débouche réellement sur des avancées spectaculaires et rapides, et que les progrès considérables qui restent à accomplir soient rapidement couronnés de succès.

Ces recherches sur les énergies renouvelables ne sont pas un luxe, vous le savez bien. C'est une exigence qui doit s'imposer, c'est une attente impatiente de nos concitoyens et des générations futures. Vous tous qui êtes réunis ici aujourd'hui, je voudrais vous féliciter d'avance. Vous êtes le panel, la représentation qui doit travailler sur ces questions et apporter cette valeur.

Au CNRS, nous espérons - nous en sommes sûrs - que cette journée sera fructueuse avec des avancées aussi audacieuses que possible, que de grandes pistes seront tracées. Nous sommes également certains qu'elle vous donnera plein d'enthousiasme et d'espoir pour vos travaux futurs.

Merci.

## Virginie SCHWARZ

Directrice Générale Déléguée de l'ADEME

Je souhaite tout d'abord adresser tous mes remerciements au CNRS et à l'UNESCO de s'être associés à l'ADEME pour organiser cette journée et fêter ensemble le 40<sup>e</sup> anniversaire de la conférence internationale organisée à Paris en 1973, « Le soleil au service de l'humanité ». Je les remercie tout particulièrement pour leur hospitalité puisqu'ils ont bien voulu accueillir l'un puis l'autre dans leurs locaux les deux sessions de notre conférence « Les énergies renouvelables au service de l'humanité ».



Crédit photo © CNRS

Cette journée est donc l'occasion à la fois de regarder en arrière ce qui s'est passé depuis 40 ans mais aussi de partager nos visions de l'avenir des énergies renouvelables.

Dans 40 ans, nous serons en 2050, une date fortement symbolique, en matière de lutte contre le changement climatique et donc de politique énergétique. C'est en particulier l'horizon choisi par la France pour son

objectif de réduction ses émissions de gaz à effet de serre (GES) par un facteur 4, alors que le rapport que vient de publier le GIEC nous a à nouveau rappelé l'importance du phénomène de réchauffement climatique de la planète et l'importance d'inscrire le développement dans des trajectoires de réduction d'émissions de GES.

### 40 ans de développement des énergies renouvelables

L'avantage des temps longs c'est qu'ils permettent de regarder les choses en prenant du recul. Au cours de ces dernières années, nous avons tous pu être marqués par les hauts et les bas dans le développement des renouvelables ou les « stop and go » dans les politiques qui les soutiennent. Dans nos colloques habituels sur les énergies renouvelables, nos débats portent souvent sur des sujets très opérationnels comme l'intérêt de supprimer les Zones de Développement de l'Eolien (ZDE) ou le montant du Fonds chaleur. Malgré leur importance, l'intérêt d'une journée comme aujourd'hui est de nous permettre de prendre un peu plus de recul.

Quel chemin parcouru depuis 40 ans ! Les énergies renouvelables sont aujourd'hui réellement installées dans le paysage institutionnel, politique, économique mondial.

Au plan institutionnel, avec par exemple la création d'une Agence internationale, l'IRENA qui leur est spécifiquement dédiée ou encore des grands programmes comme « le Plan solaire méditerranéen » préparé par l'Union pour la Méditerranée et qui devrait être adopté en fin d'année.

En termes de politiques publiques, de très nombreux pays prennent désormais en compte les énergies renouvelables, et ont mis en place des mesures de soutien, telles que les tarifs d'achat par exemple, ou des mesures d'accompagnement. L'Union européenne a joué un rôle moteur dans cette mobilisation des Etats membres. Mais de nombreux pays hors d'Europe, à commencer par l'Inde et la Chine, ont également suivi le pas.

Au plan économique, on peut souligner combien la performance économique des principales filières renouvelables a progressé sous le double effet des progrès techniques et de l'augmentation des volumes. Les grandes filières électriques en particulier sont aujourd'hui partout proches de la compétitivité et déjà compétitives dans de nombreuses situations. Dans les zones du monde les plus ensoleillées ou ventées et celles qui ont des tarifs électriques élevés, les subventions ne sont plus indispensables pour assurer la rentabilité des projets même si d'autres types d'actions publiques restent nécessaires en termes de simplification des cadres administratifs ou d'encadrement des impacts environnementaux.

Les énergies renouvelables sont également devenues au moins pour les plus grandes filières de véritables secteurs industriels, avec d'ailleurs tout ce que cela peut impliquer en termes de concurrence entre pays et de pratiques commerciales. Le récent contentieux sur le PV entre la Chine, les Etats-Unis et l'Union européenne illustre clairement le caractère de plus en plus stratégique de ce développement économique sur le plan international. La France y a pris une part encore modeste mais d'autres pays européens ont su en profiter davantage.

Au plan quantitatif, on peut considérer que le bilan est plus incertain. En volume, la production des énergies renouvelables a fortement augmenté passant de 760 Mtep en 1973 à 1740 Mtep en 2011. Par contre, leur part dans la consommation en pourcentage a finalement peu augmenté, notamment compte tenu de l'augmentation des consommations. On y reviendra tout à l'heure. Cela doit toutefois nous rappeler l'importance des politiques d'efficacité énergétique en parallèle des politiques de développement des énergies renouvelables.

### Les perspectives

Pour demain, de plus en plus de prospectives nous prédisent un avenir très renouvelable :

- L'AIE estime qu'à partir de 2015 les énergies renouvelables seront la deuxième source de production d'électricité dans le monde, derrière le charbon, et qu'elles rejoindront le charbon vers 2035, représentant alors 1/3 de la production mondiale d'électricité.
- L'Union européenne a proposé aux Etats membres en 2011, une « feuille de route pour l'énergie à l'horizon 2050 ». Celle-ci évalue de 55 à 75 %, la part des énergies renouvelables dans la consommation brute de l'UE à l'horizon 2050.

- En France, dans le cadre du débat sur la transition énergétique, l'ADEME a travaillé sur des scénarios prospectifs aux horizons 2030 et 2050, sur lesquels Anne Varet reviendra en fin de matinée. Ces scénarios projettent que la part des énergies renouvelables pourra représenter 35 % de la consommation d'énergie finale en France en 2030, et plus de 55 % en 2050.
- Les Allemands eux ont poussé la réflexion encore plus loin avec leur scénario d'une électricité 100 % renouvelable !

La perspective est donc celle d'une massification des énergies renouvelables. On peut en effet constater que les raisons de les soutenir évoluent, mais ne se réduisent pas, bien au contraire.

En 1973, on parlait beaucoup d'accès à l'énergie dans les zones non-interconnectées mais aussi de sécurité d'approvisionnement dans un contexte de choc pétrolier. Les enjeux de l'accès à l'énergie et de raréfaction des ressources demeurent naturellement mais d'autres s'y sont ajoutés.

Même si elle n'est plus aussi visible dans les priorités des grands décideurs mondiaux, la lutte contre le changement climatique doit nous conduire à privilégier les sources d'énergie décarbonées.

Mais les énergies renouvelables avec leur composante locale correspondent également à une tendance à la décentralisation, à la recherche de solutions de proximité que connaissent de nombreux pays. La montée en puissance des collectivités sur les questions d'énergie, de climat est à cet égard favorable au développement d'énergies dont l'échelle peut être plus cohérente avec leur périmètre d'action.

Les questions d'emploi et les retombées économiques liées aux énergies renouvelables sont de plus en plus visibles. L'impact sur l'emploi associé au développement de l'industrie des énergies renouvelables (comme celui des emplois dits « verts » en général) est regardé avec attention par tous les gouvernements qui cherchent des marges de croissance. En France les études identifient qu'environ 100 000 emplois directs sont aujourd'hui liés au seul développement des énergies renouvelables.

Même si ces signaux sont positifs, il reste des défis importants à relever pour envisager un nouveau cycle de développement des énergies renouvelables qui serait celui de la massification.

### Les défis

Le premier défi reste celui des coûts. La compétitivité s'accroît, mais pas pour toutes les filières et un écart même faible commence à peser quand on parle de dizaines de milliers de MW. A côté des efforts pour continuer à baisser les coûts, il faudra de nouveaux modèles économiques reposant beaucoup moins sur des fonds publics. L'auto-consommation pourrait constituer un des modèles économiques de demain.

Elle ne se conçoit plus forcément comme une contrainte face à une absence de réseau ou un choix militant mais comme une optimisation partielle permettant de combiner les avantages du raccordement à un réseau centralisé avec une optimisation économique locale.

De manière plus large, la question des coûts de la transition énergétique et celle du lien ou de l'antagonisme entre transition énergétique et croissance, a été au cœur de notre récent débat national. Alors que certains voudraient attendre la fin de la crise avant de s'engager dans la transition, nous pensons au contraire que la transition est porteuse de croissance et d'emplois. Notre scénario 2050 créerait ainsi 700 000 à 800 000 emplois de plus que le scénario de référence et environ 3 points de PIB de plus.

Le deuxième défi est celui de l'intégration à grande échelle dans les systèmes énergétiques, et en particulier au réseau électrique. Un part forte, voire majoritaire d'énergies renouvelables implique des systèmes électriques conçus autrement, avec non seulement une adaptation de l'architecture des réseaux mais aussi de leur pilotage. Adapter la consommation à la production.

## Gretchen KALONJI

*Sous-Directrice générale pour les sciences exactes et naturelles, UNESCO*

Je suis très heureuse et très honorée de représenter notre organisation à cette cérémonie dédiée au 40<sup>e</sup> anniversaire du congrès international de l'UNESCO : « Le soleil au service de l'homme ».

Depuis sa création, notre organisation est intimement convaincue de l'importance de la collaboration internationale dans le domaine scientifique pour garantir la paix et l'avenir de l'humanité. Le Préambule de la Constitution de l'UNESCO affirme d'ailleurs que « les guerres prenant naissance dans l'esprit des hommes, c'est dans l'esprit des hommes que doivent être élevées les défenses de la paix. ». Nous sommes particulièrement actifs dans les domaines de l'éducation, de la science et de la culture pour atteindre ces objectifs ambitieux.



Crédit photo © CNRS

Le troisième, c'est celui de la limite de certaines ressources, et je pense bien sûr à la biomasse. Même si des efforts accrus de mobilisation permettent encore de dégager des gisements significatifs, le passage de l'échelle de la démonstration à celle de la généralisation nous a obligé à prendre conscience que certaines ressources étaient nécessairement limitées et qu'il était donc indispensable d'utiliser ces ressources même renouvelables avec la meilleure efficacité possible.

Enfin, pour être réellement au service de l'humanité, les énergies renouvelables doivent, comme les autres énergies, être exemplaires au plan environnemental. Leur caractère renouvelable ne suffit pas à les exempter de précautions concernant leur impact sur la biodiversité, la qualité de l'air ou la santé. Surtout si ces effets se cumulent dans le cadre d'un développement à grande échelle.

Ce sont toutes ces questions et bien d'autres sur lesquelles vous allez pouvoir échanger aujourd'hui. J'espère que ces échanges seront fructueux. Je ne suis pas sûre d'être là dans 40 ans mais j'espère que nos successeurs pourront se retrouver eux aussi dans 40 ans pour constater les progrès accomplis.

Je tiens tout d'abord à remercier l'ADEME et le CNRS pour leur implication dans l'organisation de cet événement. Je remercie également la Commission nationale française et la Délégation permanente de la France auprès de l'UNESCO pour leur soutien sans faille dans les diverses activités scientifiques menées. Je suis par ailleurs heureuse de savoir que certains parmi vous ont participé au congrès de 1973. C'est une grande chance de vous compter parmi nous et de bénéficier de votre expérience.

Les représentants du CNRS et de l'ADEME ont parfaitement présenté les défis que nous aurons à relever. Je ne vais donc pas m'étendre sur l'importance des énergies renouvelables pour le développement durable. Je tiens cependant à aborder plus en détail un sujet que les intervenants précédents n'ont pas développé : la nécessité de combler l'écart en termes de capacité, de science et d'enseignement supérieur entre les pays en développement et les pays développés. L'UNESCO est particulièrement sensible à ce sujet.

J'aimerais également prendre un peu de recul et vous donner un aperçu des niches stratégiques que l'UNESCO a identifiées dans le vaste domaine des énergies renouvelables. J'espère que cela nous permettra de réfléchir à des moyens de renforcer les échanges avec l'UNESCO, les partenaires actuels et les autres parties prenantes qui ne collaborent peut-être pas encore avec l'UNESCO.

Je vais vous parler un peu de l'UNESCO et des énergies renouvelables. Nous avons une longue tradition dans ce domaine, qui date d'avant 1973. Notre travail sur les énergies renouvelables a démarré dans les années 50 dans le cadre d'une initiative majeure, le programme international de recherche sur les zones arides, dont les énergies renouvelables constituaient l'un des thèmes principaux.

Pour revenir au présent, j'aimerais exposer les grandes lignes de nos activités actuelles et les projections pour l'avenir. Je présenterai rapidement les avantages stratégiques dont nous bénéficions pour ceux qui ne connaissent peut-être pas très bien notre organisation. Comme je l'ai indiqué, nous disposons d'un mandat extrêmement vaste qui couvre l'éducation, la science et la culture. Cela nous confère un véritable avantage stratégique pour relever les défis soulevés par l'intervenant précédent. Le regroupement de trois dimensions (recherche/éducation, politique publique et culture) offre en effet un avantage majeur.

Nous profitons également du statut d'organisation intergouvernementale. Bien sûr, il faut compter avec tout ce que cela implique en termes de bureaucratie du fait de la participation de 195 États membres. Mais cela signifie aussi que nous entretenons des relations privilégiées avec les ministères concernés. Nous pouvons organiser des discussions internationales à grande échelle sur divers aspects de cette collaboration. Vous imaginez bien que les ministères concernés par les défis des énergies renouvelables sont nombreux.

Le travail avec les États membres sur l'interface entre la science et la politique dans les domaines liés aux énergies renouvelables constitue pour nous une niche stratégique importante. Nous sommes très heureux que le Secrétaire général des Nations Unies Ban Ki-moon nous ait récemment confié une nouvelle tâche consistant à mettre sur pied un conseil consultatif scientifique, pour lui-même et pour l'ensemble des Nations Unies. Je peux vous assurer que les énergies renouvelables figureront parmi les sujets prioritaires traités par ce conseil.

D'un point de vue structurel, nous sommes également très chanceux, car des 49 agences des Nations Unies, l'UNESCO est la seule dotée de commissions nationales. Ces commissions accueillent des représentants de la société civile des États membres avec lesquels nous travaillons en étroite collaboration, ce qui nous assure des résultats plus concrets sur le terrain. L'UNESCO dispose d'un autre avantage pour préparer l'avenir et les collaborations. Nous possédons un certain nombre de centres de recherche affiliés. Nous possédons des chaires UNESCO. Il en existe environ 300 dans le domaine des sciences et de l'ingénierie, et bon nombre d'entre elles concentrent leurs travaux sur les énergies renouvelables.

Les centres affiliés sont une autre ressource précieuse. Par exemple, le centre international de physique théorique de Trieste s'intéresse de plus

en plus aux énergies renouvelables. Il y a également l'Institut UNESCO-IHE pour l'éducation relative à l'eau. Dans les domaines spécifiques aux énergies renouvelables, nous avons un centre de recherche affilié à Moscou, le Centre international de l'énergie pour le développement durable. Nous avons aussi un nouveau centre à Marrakech, le Centre régional pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique.

Ces centres répartis dans le monde entier, sur lesquels les États membres s'appuient pour relever les défis auxquels la communauté internationale est confrontée, constituent de formidables ressources. L'exploitation plus efficace de ces ressources multidimensionnelles et interdisciplinaires représente à la fois un défi et une opportunité pour l'UNESCO.

Notre appartenance à la famille des Nations Unies nous donne un autre avantage stratégique. Et c'est le dernier que je mentionnerai. Les Nations Unies ont lancé l'initiative Énergie durable pour tous. L'UNESCO intervient principalement dans deux dimensions : le renforcement de la capacité de recherche et l'éducation.

Après une présentation rapide des caractéristiques structurelles de l'UNESCO, j'évoquerai quelques opportunités. Nous avons mis en place le GREET, le programme mondial d'éducation et de formation en matière d'énergies renouvelables, afin de renforcer les moyens humains et institutionnels disponibles. Comme nous le savons tous, le manque de personnel formé, notamment de chercheurs et de techniciens, est une contrainte majeure qui doit être gérée localement. Les programmes de formation sont une priorité pour promouvoir l'innovation locale.

À titre personnel, je suis convaincue que la communauté de l'enseignement supérieur est un atout stratégique pour nous. La recherche interdisciplinaire se développe et de nouveaux programmes d'enseignement sont dispensés. Nous pouvons mettre en place de nouvelles collaborations en matière de recherche basées sur des réseaux internationaux très solides. Ces collaborations seraient la clé du développement à long terme dans ce domaine.

Pour finir, j'aimerais évoquer un point auquel vous n'avez peut-être pas songé. Vous connaissez très certainement les sites du patrimoine mondial. L'UNESCO abrite également 680 réserves de biosphère dans 120 pays et travaille avec le réseau naissant de géoparcs. Ce sont, en quelque sorte, des laboratoires vivants qui nous permettent d'expérimenter des approches en matière de création d'emplois au sein des économies locales, tout en relevant les défis des énergies renouvelables.

Je termine ici ma présentation. J'espère avoir l'occasion de discuter avec vous et je suis certaine que cette réunion sera très productive.

## INTRODUCTION

## Les énergies renouvelables dans le monde

## RETOUR SUR 40 ANS D'EXPÉRIENCE

**Wolfgang PALZ***Président du Conseil Mondial des Energies Renouvelables*

Bonjour à toutes et à tous. Je suis très heureux de célébrer avec vous le 40<sup>e</sup> anniversaire du congrès « Le soleil au service de l'homme », ici à l'UNESCO. Ce congrès a constitué le véritable point de départ du développement des énergies renouvelables de l'époque moderne.

Il a été organisé par l'International Solar Energy Society (ISES) et je salue son Président, David Renné, qui nous fait l'honneur d'être présent aujourd'hui. L'Association française pour l'étude et le développement des applications de l'énergie solaire (AFEDES) et la Coopération méditerranéenne pour l'énergie solaire (COMPLES), qui réunit tous les pays méditerranéens impliqués dans le développement de l'énergie solaire, ont elles aussi participé à l'organisation du congrès de 1973.

Edmond Becquerel a ensuite découvert l'effet photovoltaïque à Paris en 1839.

Augustin Mouchot a donné la première démonstration d'énergie solaire autour de 1860. Il a également été le premier à consacrer un ouvrage à l'énergie solaire, publié en 1868. Plus d'un siècle plus tard, Hermann Scheer s'est appuyé sur ces travaux pour étudier le sujet. Edmond Becquerel a lui aussi publié un ouvrage en 1868, lequel était consacré aux effets de la lumière.

Le congrès de 1973 s'est déroulé dans un contexte socio-économique comparable à celui que nous connaissons aujourd'hui. On avait déjà pris la mesure de l'urgence des questions relatives à l'environnement et à l'énergie, telles que le changement climatique et la disponibilité limitée des ressources fossiles.



Paris, 1800 : Alessandro Volta présente sa pile électrochimique à Napoléon Bonaparte

Si vous le permettez, je vais revenir un court instant sur un autre événement capital qui s'est produit ici, à Paris. Il s'agit de la première présentation de l'électricité moderne, qui s'est tenue en 1800. Alessandro Volta avait alors présenté sa pile électrochimique à Napoléon Bonaparte. Tout le monde comprit à l'époque qu'une véritable révolution se préparait : l'électricité au service de l'humanité.

En 1961, le premier congrès des Nations Unies dédié aux énergies renouvelables s'est déroulé à Rome. Cet événement a mobilisé 2000 représentants. Suite à ce congrès, le Français Marcel Perrot, qui dirigeait l'Institut de l'énergie solaire à Alger, a créé la COMPLES. Il s'agit de l'auteur de l'ouvrage « La houille d'or », qui a consacré toute sa vie au développement de l'énergie solaire.

D'autres pionniers de l'énergie solaire se sont illustrés à cette époque, notamment Félix Trombe et Pierre Auger. Ce dernier a d'ailleurs prononcé le discours d'ouverture du congrès de 1973. Michel Rodot du CNRS, Pierre Vasseur du CNES, Jean-Pierre Girardier de Sofretes, Alain Liébard d'Énergies pour le Monde et Philippe Chartier de l'INRA furent également des acteurs clés de ce congrès. J'ai moi-même organisé pour le compte du CNES la section consacrée à l'énergie photovoltaïque. Nous avons reçu le soutien de Wernher von Braun, le père du programme Apollo. Il fut le premier à parler d'« ère solaire ».

À l'échelle internationale, le congrès de 1973 a été suivi de la conférence des Nations Unies pour les sources d'énergie nouvelles et renouvelables à Nairobi en 1981. Tous les participants faisaient preuve de bonne volonté, mais cette conférence a marqué la fin de l'intérêt pour les énergies renouvelables. L'euphorie que suscitait l'énergie nucléaire a éclipsé toutes les autres sources d'énergie. Seule la catastrophe de Tchernobyl intervenue en 1986 a remobilisé la classe politique autour du développement de l'énergie solaire.

Finalement, la commission de Bruxelles a présenté en 1997 un plan d'action européen en faveur des énergies renouvelables à l'horizon 2010. À cette époque, l'énergie solaire et les composants associés étaient quasi inexistantes sur les marchés. Mais un incroyable changement de paradigme s'est opéré au profit des énergies renouvelables, que la Commission européenne a qualifié par la suite de « révolution industrielle ».

L'événement suivant est la Conférence internationale pour les énergies renouvelables qui s'est déroulée à Bonn en 2004 et qui a réuni 3000 participants. Hermann Scheer, le célèbre porte-drapeau allemand de l'énergie solaire, avait suggéré au Chancelier Gerhard Schroeder d'inviter les gouvernements du monde entier à cette conférence. Celle-ci a eu plusieurs conséquences directes, dont la création de REN21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century) à Paris et celle de l'Agence internationale des énergies renouvelables (IRENA) à Abou Dabi avec le soutien de la Chancelière Angela Merkel.

Une autre initiative importante pour la promotion de l'énergie solaire en Europe a été lancée en 2004. Cette année-là, le Parlement européen a exhorté la Commission et le Conseil à engager le processus politique de définition d'objectifs en matière d'énergies renouvelables. Il suggérait un taux d'utilisation de 20 % au sein du secteur européen de l'énergie d'ici 2020. La proposition a été adoptée en 2009 lors des présidences française et allemande du Conseil. Nicolas Sarkozy et Angela Merkel se sont engagés personnellement vis-à-vis de cette mesure.

Voyons maintenant quelques-uns des résultats impressionnants obtenus en matière d'énergies renouvelables entre 2000 et 2013. Nous sommes partis de presque rien et aujourd'hui, nous disposons de 510 000 MW installés d'énergies renouvelables dans le monde (solaire photovoltaïque, éolien et biomasse) contre 47 000 MW en 2000. La puissance installée en Europe atteint 213 000 MW. L'Allemagne s'est rapidement positionnée comme leader mondial dans le déploiement de l'énergie éolienne et, jusqu'à l'année dernière, du solaire photovoltaïque. Elle disposait en 2013 de 75 000 MW installés dans les secteurs éolien, photovoltaïque et biomasse.

Fin 2013, 130 000 MW d'énergie photovoltaïque étaient installés dans le monde contre 1400 en 2000, soit une multiplication par 100 ! Dans le secteur éolien, nous disposons de 320 000 MW installés à l'échelle mondiale.

Les biocarburants (bio-éthanol) ont eux aussi connu une croissance explosive, passant de 16 milliards de litres produits en 2000 à 100 milliards il y a 3 ans.

Cette activité a créé 5,7 millions d'emplois dans le monde, dont 1,2 million en Europe (380 000 en Allemagne).

Pour conclure, si vous souhaitez plus de détails, je vous invite à consulter une nouvelle série d'ouvrages que j'ai publié : *Solar Power for the World*. Il s'agit de plusieurs volumes qui détaillent les progrès au niveau mondial dans les domaines du solaire photovoltaïque, de l'éolien et de la biomasse.

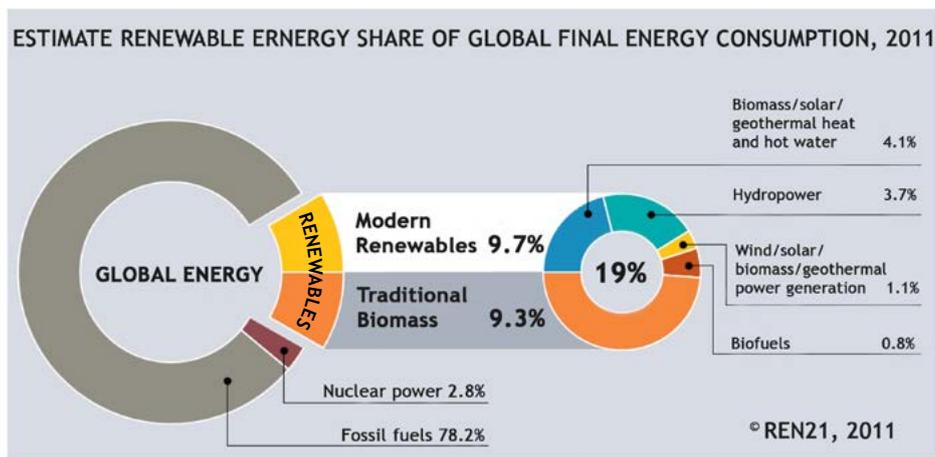
## LA SITUATION MONDIALE DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

**Christine LINS**

Secrétaire exécutive de REN21

C'est un grand honneur de participer à ce congrès 40 ans après que les pionniers des énergies renouvelables ont engagé cette révolution, à une époque où je n'étais moi-même pas née. C'est avec beaucoup d'humilité que je me présente aujourd'hui devant vous pour parler du statut

des énergies renouvelables dans le monde. Comme l'a indiqué Wolfgang Palz tout à l'heure, nous avons déjà parcouru un long chemin, mais je suis sûre que le meilleur reste à venir. Je pense que les énergies renouvelables présentent un potentiel exceptionnel que nous avons à peine commencé à exploiter.



Source: REN21 Renewables 2013 Global Status Report

Estimation de la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie au niveau mondial en 2011

Je vais vous parler du statut des énergies renouvelables dans le monde. En 2011, 19 % de l'énergie finale consommée à l'échelle internationale étaient issus de sources renouvelables. Pour rappel, avec l'initiative Énergie durable pour tous, le Secrétaire général des Nations Unies espère doubler la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique mondial, la faisant passer de 18 % en 2010 (l'année de référence) à 36 % en 2030. Il existe déjà un objectif intermédiaire qui consiste à développer fortement le recours mondial aux énergies renouvelables dans les années à venir.

Toutefois, les énergies renouvelables actuelles proviennent pour une moitié de la biomasse traditionnelle et pour l'autre de sources renouvelables modernes. Si nous voulons atteindre cet objectif, nous ne devons pas seulement doubler, mais au moins tripler les énergies renouvelables modernes, qui incluent l'énergie hydroélectrique. Il est important de garder ce point à l'esprit.

Dans le domaine de l'électricité, environ 26 % de la capacité de production mondiale d'énergie sont basés sur des sources renouvelables et 22 % de l'électricité mondiale sont produits à partir de sources renouvelables. À l'échelle de la planète, les sources d'énergie renouvelables représentaient un peu plus de la moitié de la nouvelle capacité électrique installée en 2012. C'est assez impressionnant quand on pense que plus de la moitié des centrales électriques construites en 2012 étaient basées sur des sources d'énergie renouvelables. C'est une moyenne mondiale. Au sein de l'Union européenne, ce chiffre approchait 72 % en 2012.

Plus des 2/3 de la capacité de production électrique installée étaient basés sur des sources d'énergie renouvelables. Le photovoltaïque en représente une grande part, mais l'éolien et toutes les autres sources d'énergie renouvelables ne sont pas négligeables. Ce développement est tout à fait remarquable. On peut voir que les énergies renouvelables se généralisent et occupent une place de plus en plus importante dans les systèmes énergétiques du monde entier. N'oublions pas que l'énergie ne couvre pas uniquement le secteur

de l'électricité. On consomme également beaucoup d'énergie pour le chauffage, la climatisation et le transport. Les énergies renouvelables progressent d'ailleurs dans ces domaines.

Wolfgang Palz a évoqué l'incroyable évolution du solaire photovoltaïque dans le monde. Nous avons suivi son développement de 1995 à nos jours. Pendant 15 ans, le secteur a été très calme, avant de décoller au cours des 4 dernières années. Comme l'a indiqué Wolfgang, nous disposions à l'automne 2013 de 130 GW. Fin 2012, la puissance installée en photovoltaïque était de 100 GW. Cette valeur a toujours été considérée comme une étape importante et aucun des participants du congrès de 1973 ne pensait qu'il était possible de l'atteindre.

Les prix du solaire photovoltaïque ont également affiché une forte baisse. Ils ont baissé de plus de 30 % en 2012, après des baisses conséquentes les années précédentes. Il ne faut pas non plus oublier que les acteurs du secteur ont dû faire face à des difficultés qui ont conduit à certaines consolidations. Le photovoltaïque trouve de nombreuses applications dans le monde, y compris au travers d'installations à grande échelle et les systèmes énergétiques des pays en développement s'appuient de plus en plus sur les énergies renouvelables.

Il me semble également intéressant d'observer les synergies avec d'autres technologies. Voyons par exemple l'évolution des télécommunications. Certains d'entre nous connaissent encore les téléphones à cadran. Il y a 40 ans, personne n'aurait imaginé que nous serions aujourd'hui tous équipés de smartphones qui nous rendraient joignables à tout moment et nous permettraient de consulter nos e-mails où que nous nous trouvions. Nous pouvons nous demander si c'est une bonne chose.

Quoi qu'il en soit, l'association des énergies renouvelables et d'autres technologies ouvre de nombreuses perspectives. Nous pouvons voir que dans les pays en développement, de plus en plus de stations mobiles sont équipées de panneaux photovoltaïques.

Nous assistons à l'union des technologies modernes des télécommunications et de l'énergie. L'énergie éolienne a connu le même succès. En 2012, 45 GW supplémentaires ont été installés, portant la capacité mondiale à 283 GW. Les taux de croissance annuels de la capacité éolienne cumulée affichent une moyenne de 25 % sur les 5 dernières années. Peu de secteurs peuvent se vanter de tels résultats.

L'éolien a par ailleurs également bénéficié de nombreuses améliorations techniques. En 1985, le diamètre de rotor des turbines éoliennes était de 15 mètres. Aujourd'hui, il atteint 160 m, soit deux fois l'envergure d'un Airbus A380. Ces dernières années, l'évolution de la technologie a été explosive. Nous avons déjà renforcé notre potentiel de R&D pour les prochaines années.

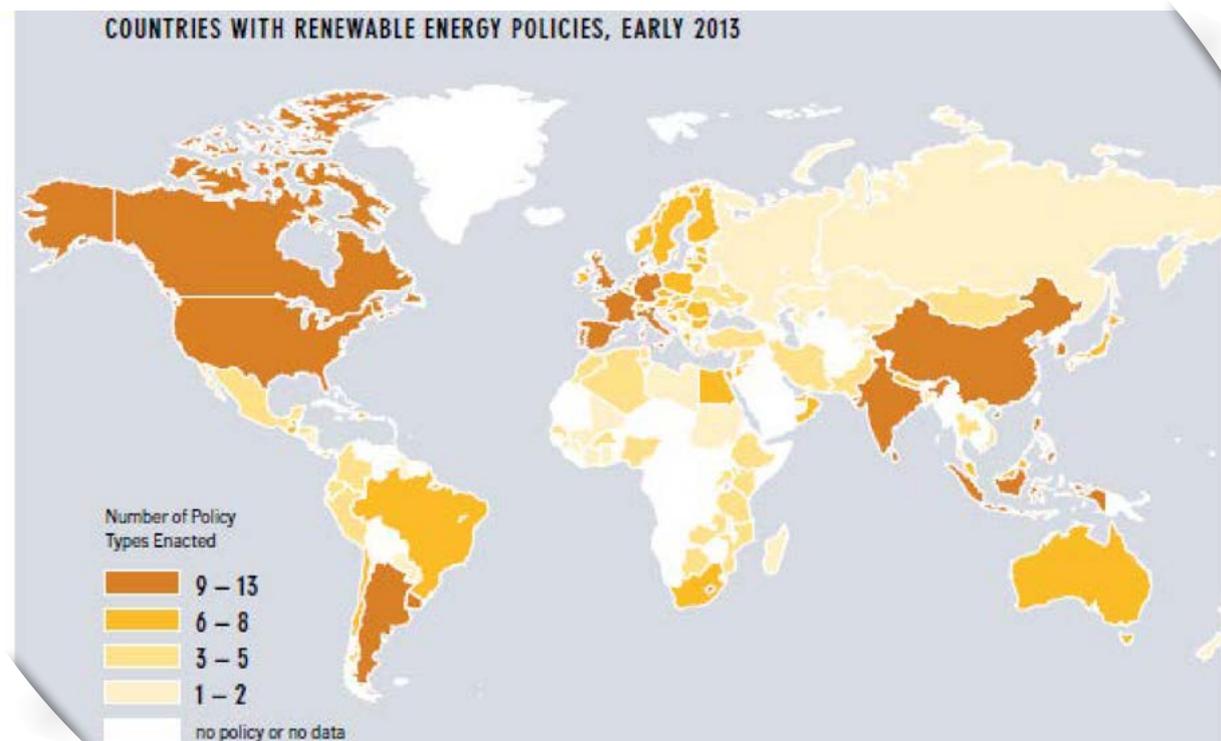
Les politiques en faveur des énergies renouvelables mises en place par les gouvernements sont en partie motivées par l'impact positif évident qu'elles ont sur l'économie. Selon une étude réalisée par l'IRENA, le secteur des énergies renouvelables représente 5,7 millions d'emplois dans le monde. J'ai déjà évoqué les différentes technologies qui ont bénéficié de ces créations d'emplois. Et le nombre d'emplois continue d'augmenter dans le monde entier, ce qui me semble très important.

Les investissements ont quant à eux enregistré leur première baisse en 2012. Elle s'établissait globalement à 12 %. Pour autant, cette année reste la deuxième meilleure année en termes d'investissements. En parallèle, la capacité installée a continué à augmenter du fait de la baisse des coûts de la technologie. Autre signe encourageant, un rééquilibrage des investissements s'est opéré au profit des pays en développement.

En 2012, ils ont réalisé environ 46 % des investissements mondiaux (112 milliards de dollars), soit une augmentation de 34 % par rapport à 2011. Les investissements des pays développés ont dans le même temps chuté de 29 %, passant à 132 milliards. Pourquoi dis-je que c'est encourageant ? Il ne faut pas oublier que les pays en développement se trouvent dans une partie du monde où les besoins en énergie sont en croissance constante, d'où la nécessité d'augmenter la capacité. Leur situation est donc totalement différente de celle des pays développés, qui sont fréquemment en surcapacité. Dans les régions faisant face à une augmentation de la demande, il est très encourageant que les énergies renouvelables trouvent leur place.

C'est également le cas au niveau politique. Actuellement, 140 pays se sont fixé des objectifs en matière d'énergies renouvelables et environ 130 ont instauré des politiques en faveur de ces énergies. Le nombre de pays s'étant fixé des objectifs a plus que doublé entre 2005 et 2012, ce qui est remarquable. Géographiquement, les énergies renouvelables gagnent du terrain et la baisse des coûts offre des possibilités illimitées.

Wolfgang a déjà un peu abordé la situation actuelle. et nous avons pu constater que les projections historiques étaient erronées. Nous venons de mettre la main sur une édition de 1974 du Courrier de l'UNESCO, qui a été publiée après le congrès il y a 40 ans. Un scientifique américain y présentait les réserves des cinq premières sources d'énergie mondiales. Selon les projections, l'épuisement des réserves de gaz naturel devait intervenir au plus tôt en 1994 et au plus tard en 2015. Nous savons tous que les choses ne se sont pas exactement passées ainsi. Mais nous disposons d'autres projections sur lesquelles je vais me pencher plus en détail.



Pays ayant instauré des politiques de développement des énergies renouvelables

La Banque mondiale prévoyait une capacité éolienne de 7 GW à l'horizon 2020. Près de 60 GW étaient déjà installés en 2011. Il y a donc un gros décalage entre la projection et la situation 10 ans avant l'échéance fixée. Lorsqu'on étudie tous les scénarios sur les perspectives, la tendance paraît assez claire. Il y a l'initiative Énergie durable pour tous, dont l'objectif est de doubler la part des énergies renouvelables. Certains scénarios sont très optimistes, d'autres beaucoup moins.

Nous devons nous servir des erreurs passées pour regarder l'avenir avec confiance. Et cela n'est possible que si des politiques adéquates sont en place. Nous devons mettre l'accent sur l'intégration des énergies renouvelables, à la fois d'un point de vue technique et d'un point de vue politique. Nous devons déployer rapidement des technologies propres basées sur les énergies renouvelables.

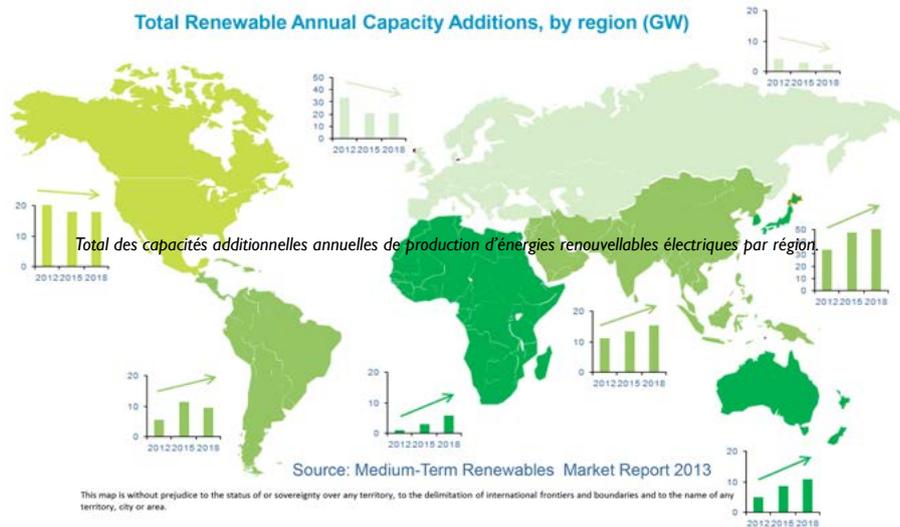
## LES PERSPECTIVES MONDIALES DES ÉNERGIES RENOUVELABLES AUX HORIZONS 2030 ET 2050

**Paolo FRANKL**

*Chef de la Division Énergies renouvelables, Agence Internationale de l'Énergie (AIE)*

Je remercie le CNRS, l'ADEME et l'UNESCO de nous donner la possibilité de partager avec vous notre vision de l'avenir des énergies renouvelables. Tout d'abord, comme l'a indiqué Christine, il faut voir plus loin que l'électricité. Si nous regardons la part des énergies renouvelables dans les différents secteurs en 2011, l'électricité se distingue avec 20 %. Cependant, les chiffres sont beaucoup plus modestes dans tous les autres secteurs si on exclut la biomasse traditionnelle dans les pays en développement. Globalement, nous devons faire beaucoup plus en termes de consommation d'énergie finale.

Intéressons-nous maintenant à nos projections pour les cinq années à venir, car cette étape est importante pour voir plus loin. Les messages sont très divers. Selon l'un d'entre eux, nous assisterons dans les 5 années à venir à une augmentation progressive, mais massive de 40 % d'électricité renouvelable, et ce malgré les difficultés économiques rencontrées par certaines régions du monde et les fortes incertitudes politiques qui pèsent sur certains pays, notamment en Europe et aux États-Unis.



### ■ Emerging markets more than compensate for slowing growth and volatility in markets such as Europe and the US

Nous avons souligné de nombreuses tendances très positives et je pense que ma présentation viendra conforter cette vision. Je tiens tout de même à lancer un appel à la prudence. Ne pensez pas que tout le travail de développement nécessaire pour les 40 années à venir se fera tout seul. Il faudra des politiques cohérentes à long terme, claires, soutenues et prévisibles. Je pense en particulier à l'Europe et aux États-Unis.

Il apparaît très clairement à présent que les moteurs de cette progression ne sont plus seulement l'Europe et les États-Unis. Il ne s'agit plus uniquement de l'OCDE, comme cela a été le cas par le passé. À ce sujet, j'ai deux remarques. Tout d'abord, d'ici 2015 ou 2016, les énergies renouvelables seront devenues la deuxième source d'électricité, supplantant le gaz.

Leur part représentera deux fois celle du nucléaire. En fait, c'est même déjà le cas avec la situation du Japon, où tous les réacteurs nucléaires sont à l'arrêt.

Ensuite, si nous faisons la comparaison avec le scénario 2°C (2DS) à l'horizon 2020, les choses sont bien engagées. Les énergies renouvelables comptent parmi les quelques technologies qui contribuent à l'atténuation du changement climatique. Je dois toutefois ajouter que les énergies renouvelables fleurissent partout et ce n'est pas nécessairement dû au changement climatique, loin de là. Dans les pays en développement et les économies émergentes, c'est plus une question d'approvisionnement en énergie, de diversification énergétique et de prise en charge de problèmes de pollution locale. Prenez l'exemple de la Chine, avec ses centrales au charbon.

Comme l'a dit tout à l'heure la Directrice générale déléguée de l'ADEME, c'est une combinaison de raisons. Les énergies renouvelables sont utilisées et se développent pour de nombreuses raisons. En ce qui concerne la capacité installée, les marchés émergents font plus que compenser la croissance lente ou la volatilité observée sur les marchés européen et américain.

Les énergies renouvelables ne sont pas seulement la deuxième source d'énergie, elles approcheront le niveau du charbon en 2035. Il s'agit du scénario central des Perspectives énergétiques mondiales, connu sous le nom de scénario « nouvelles politiques ». Selon le scénario « 450 ppm » (450 parties par million), les énergies renouvelables dépasseront 15 000 TWh et deviendront la première source d'électricité, énergie hydraulique incluse, avant 2030.

Si l'on regarde encore plus loin, la tendance est plus prononcée. Prenons l'exemple du scénario 2°C de l'AIE. Il existe de nombreux scénarios, mais je tiens à parler de celui-ci, qui optimise les coûts totaux

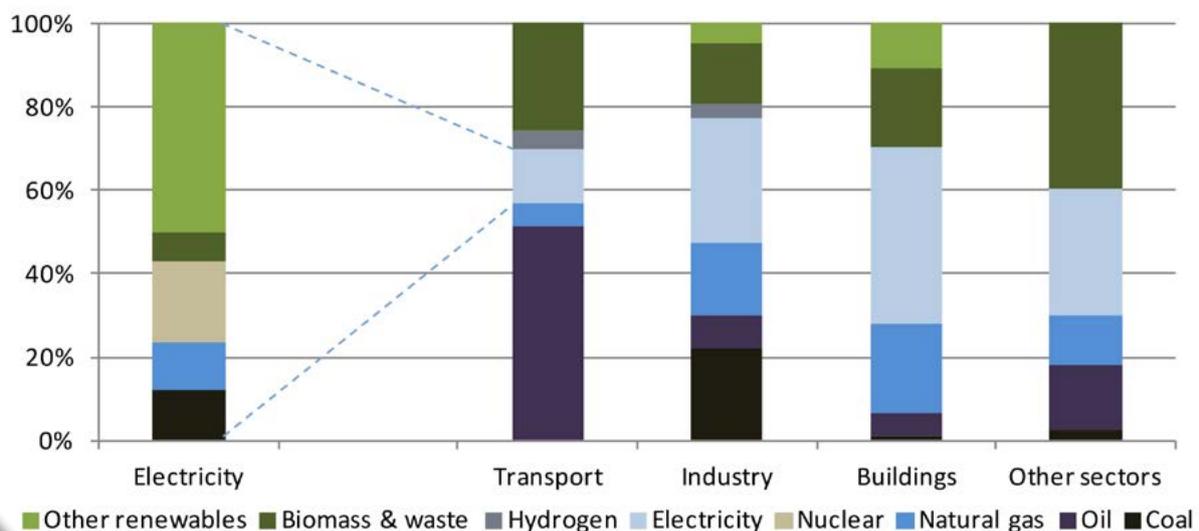
du système d'ici l'échéance fixée. Selon ce scénario, les énergies renouvelables représenteront 57 % de l'électricité totale produite d'ici 2050. Nous disposons toutefois d'un scénario haut d'utilisation des énergies renouvelables en cas de ralentissement de la croissance du nucléaire et du captage et du stockage du carbone. Selon ce scénario, le rôle des énergies renouvelables dépassera 70 %.

Cet aspect est particulièrement important. 22 % de l'énergie, 32 % dans le scénario haut, proviendront de diverses sources renouvelables, telles que le solaire photovoltaïque, l'éolien et l'énergie marine. Il devient de plus en plus nécessaire de mettre en place des procédures, des politiques et des cadres réglementaires appropriés pour intégrer ces énergies au mix énergétique. La technologie se trouve au cœur de cette grande transition.

L'AIE produit toute une série de feuilles de route. Nous présenterons celle du secteur éolien la semaine prochaine à Pékin. Elle n'a pas été établie par hasard, car l'éolien pourrait représenter 15 à 18 % de l'approvisionnement total en électricité à l'horizon 2050. Nous avons assisté à de nombreuses évolutions technologiques importantes, notamment au cours des dernières années. Les facteurs de capacité et la possibilité de produire davantage d'énergie éolienne sur un nombre plus limité de sites tout en étant plus respectueux de l'environnement ont augmenté. Ce ne sont là que de très bonnes nouvelles.

Par ailleurs, comme je l'ai déjà dit, nous nous intéressons davantage aux systèmes de chauffage et de refroidissement. Les efforts politiques et le développement n'en sont qu'à leurs balbutiements dans ce secteur. Nous avons consigné quelques développements dans une autre feuille de route consacrée à ce sujet.

## Total final energy consumption in 2050 in the 2DS



Total de la consommation finale d'énergie en 2050 dans le scénario 2°C

Le chauffage et le refroidissement solaires peuvent être multipliés par 25 d'ici 2050 et couvriraient alors 14 % de la demande totale en eau chaude et chauffage de bâtiments. Cela représenterait 20 % de la demande totale en chauffage basse température dans l'industrie et 17 % de la demande en refroidissement. Ces chiffres sont très positifs, mais certains pourraient rétorquer que nous pouvons mieux faire... Et il est vrai que du point de vue de l'utilisation de l'énergie finale à des fins de chauffage dans notre scénario 2°C, les énergies renouvelables ont un rôle très important à jouer. Elles représenteront plus de 50 % du chauffage des bâtiments, bien que la majorité soit issue de la biomasse. Elles auront également un rôle à jouer dans les systèmes de chauffage et de refroidissement solaires.

En ce qui concerne le transport et les biocarburants, la priorité doit être donnée à l'amélioration de l'efficacité énergétique et au déploiement de différents types de carburant, dont l'électricité. Nous devons redoubler d'efforts dans les transports publics. Si nous nous en tenons à ces principes, les biocarburants peuvent représenter un quart des carburants utilisés s'ils sont produits et consommés de façon durable.

À cet égard, j'aimerais attirer votre attention sur le fait que tous les biocarburants de première génération disparaîtront pour des raisons de durabilité. Nous aurons besoin de carburants beaucoup plus évolués qui utiliseront principalement la biomasse résiduelle. Leur empreinte environnementale sera ainsi plus durable et ils engendreront moins de problèmes en termes de concurrence avec la production alimentaire, par exemple. De nombreux autres progrès ont également été réalisés. Ces technologies sont actuellement en phase de R&D avancée ou de pré-commercialisation. Elles doivent bénéficier d'un soutien politique plus solide et plus prévisible.

Comment nous représentons-nous la situation en 2050 ? Les énergies renouvelables occupent une place prépondérante dans le scénario 2°C. Comme je l'ai indiqué précédemment, elles représentent 57 % de l'électricité produite. L'électricité ne constituera qu'une partie de la consommation finale dans d'autres secteurs, mais les énergies renouvelables devront également jouer un rôle clé comme source directe de chaleur dans ces secteurs. Cette situation contraste fortement avec celle décrite dans le scénario 2000 de l'AIE et exigera un effort soutenu de la part des responsables politiques.

En ce qui concerne le pic pétrolier, il a peut-être été atteint pour le pétrole brut classique. Mais si l'on regarde les ressources de carburants fossiles non traditionnelles qui se développent actuellement, la situation est totalement différente. Les carburants fossiles feront encore longtemps concurrence aux énergies renouvelables. Ces dernières doivent apporter la preuve de leur supériorité sur les carburants fossiles sur de nombreux aspects, notamment économique, durable et sociétal, et cela

ne pourra se faire sans soutien politique.

Nous voyons quatre éléments politiques principaux. Tout d'abord, nous avons besoin d'une stratégie et d'objectifs clairs et non de politiques fluctuantes. C'est un problème de longue date dans certains pays européens et aux États-Unis avec la prolongation du crédit d'impôt. Une fois que des stratégies claires auront été définies, il faut mettre en place des mesures incitatives intelligentes. Par intelligentes, j'entends qu'elles doivent être efficaces d'un point de vue économique et qu'elles doivent diminuer à mesure que la technologie avance. Elles ne doivent pas conduire à une consommation excessive.

Le troisième point porte sur les obstacles non économiques qui limitent parfois le développement des énergies renouvelables. On ne peut pas prétendre lutter contre avec de l'argent, mais avec des politiques plus efficaces.

Dernier point, mais pas des moindres, nous devons anticiper l'intégration du système. Nous allons publier une grande étude sur l'intégration des énergies renouvelables au réseau énergétique.

Nous montrerons qu'elle peut être prise en compte immédiatement lors de la définition des stratégies et de la planification, en particulier dans les économies émergentes. Cela signifie qu'il est possible de réduire sensiblement les coûts supplémentaires. Beaucoup parlent des coûts de l'intégration du solaire et de l'éolien, mais personne n'évoque les opportunités que peuvent offrir des systèmes beaucoup plus flexibles sur les marchés nouveaux et émergents.

Nous souhaitons nous intéresser en particulier à la chaleur, car nous pensons qu'elle recèle un potentiel sous-exploité. Nous établirons trois autres feuilles de route technologiques d'ici un an. Nous compilerons nos rapports de marché. Nous aurons alors les nouveaux grands scénarios énergétiques. Pour la deuxième année consécutive, nous consacrerons un chapitre des chiffres aux énergies renouvelables. Un chapitre de la publication ETP (Energy Technology Perspectives) 2014 sera dédié à l'énergie solaire.

Pour conclure, je tiens à mentionner notre implication dans l'initiative Énergie durable pour tous et notre collaboration avec l'IRENA sur la constitution d'une base de données qui recense les politiques et les coûts des énergies renouvelables. Je tiens également à remercier l'ADEME pour le soutien financier qu'elle a apporté à nos activités passées, et je l'espère, à nos activités à venir. L'AIE est très active dans la défense et la promotion des énergies renouvelables tout en gardant à l'esprit l'offre et la demande futures sur l'ensemble du mix énergétique.

## LES NOUVELLES PERSPECTIVES DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

### Frank WOUTERS

Directeur général adjoint de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA)

Certaines parties de mon discours feront écho aux interventions précédentes. Je présenterai rapidement l'IRENA, car sa création est récente et vous ne savez peut-être pas tous qui nous sommes et ce que nous faisons. J'évoquerai ensuite la transformation du secteur énergétique et, pour faire suite à la présentation de Wolfgang, j'aimerais parler plus en détail du photovoltaïque. Je ne dresserai pas un tableau complet du photovoltaïque, mais j'en aborderai certains aspects. Je vous parlerai également de l'impact de cette énergie sur les différents acteurs du secteur.

L'IRENA est une nouvelle organisation. Elle a été fondée il y a deux ans, plus précisément en avril 2011, après une longue préparation. Nous sommes chargés de la promotion des énergies renouvelables à l'échelle mondiale et à ce titre, nous aidons les pays à mener à bien leurs programmes.

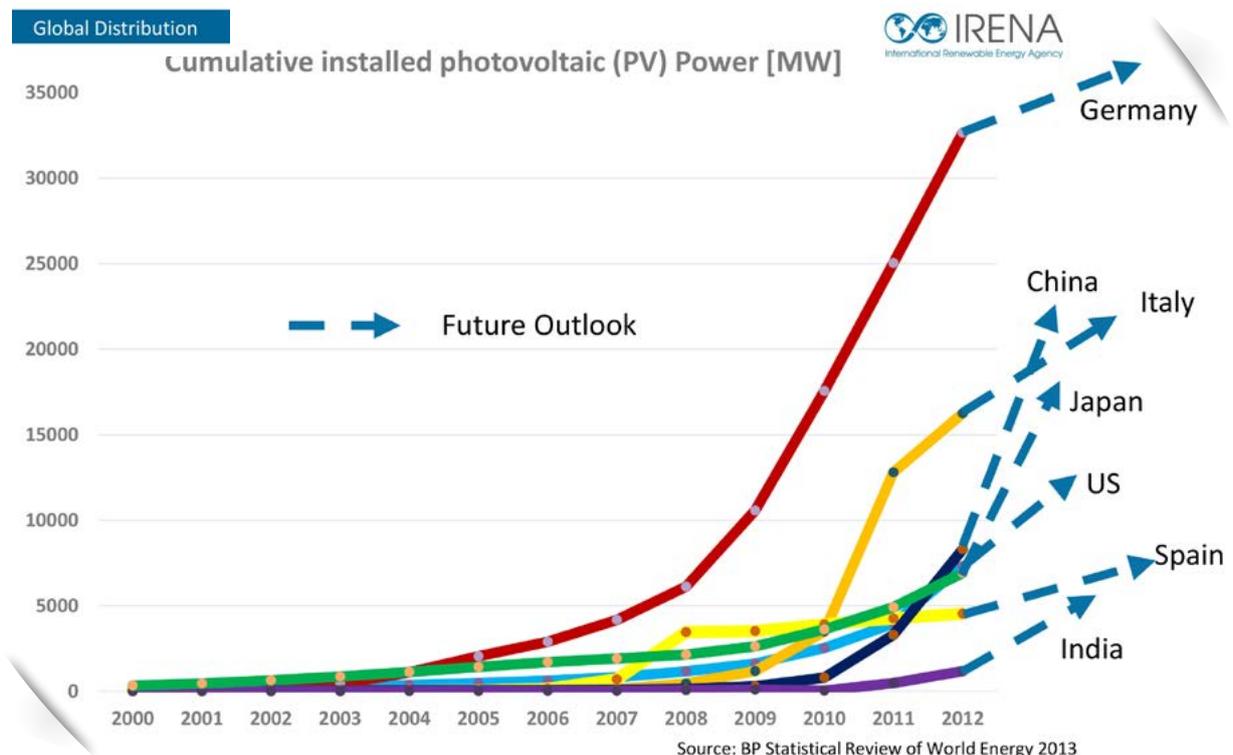
Notre siège est installé à Abou Dabi, ce qui fait de nous la première organisation internationale au Moyen-Orient. Nous représentons plus de 160 pays, dont 118 sont des membres permanents, les autres étant en cours d'adhésion. Nous disposons de deux centres : le siège à Abou Dabi et un centre d'innovation et de technologie à Bonn, en Allemagne. Nous sommes observateur permanent auprès des Nations Unies, où nous avons récemment ouvert un petit bureau. Nous

sommes une petite organisation. Nous ne souhaitons pas être une agence d'exécution comme les Nations Unies en comptent déjà beaucoup. Nos maîtres mots sont simplicité, flexibilité et efficacité.

Je vais à présent revenir au sujet qui nous intéresse. Nous vivons actuellement une période de très grande transformation dans le secteur de l'énergie. Pour illustrer ce phénomène, je vais vous parler un peu du photovoltaïque. Je vais également aborder les prévisions, comme l'on fait d'autres intervenants avant moi. La bonne nouvelle, c'est que vous allez découvrir de nouvelles prévisions. Contrairement à Wolfgang, je n'ai pas la chance de pouvoir revenir sur mes propres prévisions, car nous n'avons que deux ans d'existence.

Reprenons les chiffres que l'on anticipait sur le niveau du photovoltaïque en 2010. L'un d'eux est très intéressant, car il provient de PHOTON Consulting, une société de conseil. En 2007, elle prévoyait que le photovoltaïque atteindrait 13,3 GW en 2010. En réalité, nous étions à 40 GW.

En observant les marchés, vous pourrez remarquer que l'Allemagne arrive en tête, principalement grâce à sa loi sur les énergies renouvelables. L'Espagne est ensuite arrivée sur le marché, mais a connu un tassement assez rapide. L'Italie est toujours présente et produit de nombreux systèmes photovoltaïques.



Capacité mondiale cumulée installée d'énergie photovoltaïque

Mais le développement intervient essentiellement en Asie, comme l'a déjà souligné Christine. On constate une forte croissance en Chine et au Japon. L'Inde entreprend un démarrage lent, mais finira certainement en bonne place sur le marché du photovoltaïque.

C'est une situation difficile pour les acteurs du secteur, car cela nécessite une adaptation constante aux évolutions de ces marchés ; et il faut dire que cela deviendra à l'avenir de plus en plus complexe. Si vous analysez de plus près le développement de ces marchés, vous pouvez vous apercevoir qu'ils connaissent de véritables explosions. Si vous regardez ce qu'il s'est passé en un an en Espagne, le marché a littéralement explosé. Cela a également été le cas en Allemagne et en Italie. Ces explosions sont rapidement suivies d'une période de saturation. Les prochaines explosions toucheront le Japon cette année, puis la Chine.

Une nouvelle fois, ces situations constituent un défi, car elles nécessitent une adaptation massive et rapide de la capacité. Et ce n'est pas simple pour les sociétés. À quoi est due cette situation ? Comme l'a expliqué Paolo, le développement des énergies renouvelables a été jusqu'à présent principalement le fait de mesures politiques. Or, je pense que cela va rapidement changer. Les marchés ont été créés par les politiques et nous voici avec une alliance entre la Chine et l'Allemagne. Les Chinois ont fait baisser les prix du photovoltaïque et les Allemands ont créé le marché, ce qui nous a conduits à une spirale de réduction des coûts.

L'IRENA a mené en 2012 une étude de grande ampleur qui a permis de déterminer que le prix moyen du photovoltaïque avait baissé de 60 % sur ces deux dernières années. Nous sommes sur une courbe d'apprentissage de 22 %, ce qui signifie qu'à chaque fois que la capacité des marchés doublera, les prix baisseront de 22 %. Des chiffres fluctuants ont été annoncés concernant cette courbe, mais elle se situe bien à 22 %. Si les marchés continuent à se développer, le prix des cellules photovoltaïques continuera à baisser.

Mais nous avons également pu constater une grande diversité de prix. Dans le cadre de notre analyse, nous nous sommes intéressés aux coûts réels de 8000 projets. Nous avons découvert d'immenses écarts entre les régions. Par exemple, le prix d'un système photovoltaïque pour toiture peut varier du simple au double entre l'Allemagne, la Californie et le Japon. Cet écart est en grande partie dû aux coûts accessoires liés à la bureaucratie et à la paperasserie. L'installation de ce type de système en Allemagne nécessite un seul document. En Californie, il vous faudra fournir un nombre incalculable de certificats de non-opposition, de certificats de sécurité, de permis de construire et j'en passe. Si les gouvernements veulent réellement soutenir le photovoltaïque pour diverses raisons, ils peuvent également se pencher sur ces points.

Je vais évoquer l'impact sur le secteur traditionnel, qui est déjà très important pour les opérateurs

historiques. Par exemple, une grande partie des énergies renouvelables en Allemagne grignote les bénéfices des énergies traditionnelles. Les quatre principaux fournisseurs d'énergie du pays représentent seulement 6 % des investissements globaux dans les énergies renouvelables. Du point de vue boursier, le prix de l'action RWE par exemple, ne cesse de baisser. Cela concerne uniquement l'année dernière.

Un institut de recherche mandaté par le gouvernement a émis une recommandation politique. Il conseille à l'Allemagne d'adopter un nouveau système d'énergies renouvelables calqué sur le modèle suédois. Je ne pense pas que cela se fera, car le soutien politique semble insuffisant. Mais cela montre que les marchés ont bien réagi à cette recommandation. Le secteur a montré un regain d'intérêt pour les énergies renouvelables. Reste à voir quelle forme cela prendra. Quoi qu'il en soit, l'impact sur les opérateurs historiques est immense et ils ne se sont pas pour autant tournés vers les énergies renouvelables.

Je vais vous donner les prévisions de PHOTON Consulting 2007, qui sous-estimaient largement le photovoltaïque en 2010. La société a décrit récemment ce qu'elle appelle un effet de réseau négatif. Vous pouvez disposer d'un réseau dont la plupart des coûts sont fixes, comme c'est le cas du système d'électricité. Vos bénéfices peuvent ensuite baisser en raison d'une croissance nulle, voire négative. Ceci est dû au fait que les consommateurs sont plus responsables. S'ils installent des cellules photovoltaïques sur leur toit, leur demande vis-à-vis du système à coûts fixes va continuer à baisser. Vous devrez ensuite augmenter les coûts unitaires de vos systèmes fixes : les réseaux, les centrales au charbon, etc. Cela conduira à une consommation encore plus efficace de l'énergie et peut-être à l'installation de davantage de panneaux photovoltaïques sur les toits. Actuellement, les batteries ne sont pas rentables, mais elles pourraient le devenir rapidement.

Au niveau géopolitique, on voit déjà que les États-Unis sont de moins en moins dépendants des importations. Il ne faudrait pas non plus trop encenser les énergies renouvelables, car cette situation provient en grande partie du gaz de schiste. Mais le fait est que le déploiement de deux porte-avions dans le Golfe a été retardé. Il n'y en a plus qu'un au lieu de trois. Le gouvernement a décidé de renoncer au projet pour des raisons budgétaires. On voit déjà que le système énergétique a également un impact sur la géopolitique. Si vous pensez que des porte-avions sont nécessaires dans le Golfe, la Chine va les fabriquer et vous lui demanderez de les déployer.

Qu'est-ce que cela signifie pour les utilisateurs finaux ? Je pense que nous assisterons à une nouvelle transformation dans les deux années à venir. Jusqu'à présent, le photovoltaïque distribué a bénéficié d'un soutien politique, notamment par le biais des tarifs d'achat et des mises aux enchères. On trouve cependant de plus en plus d'endroits sur la planète,

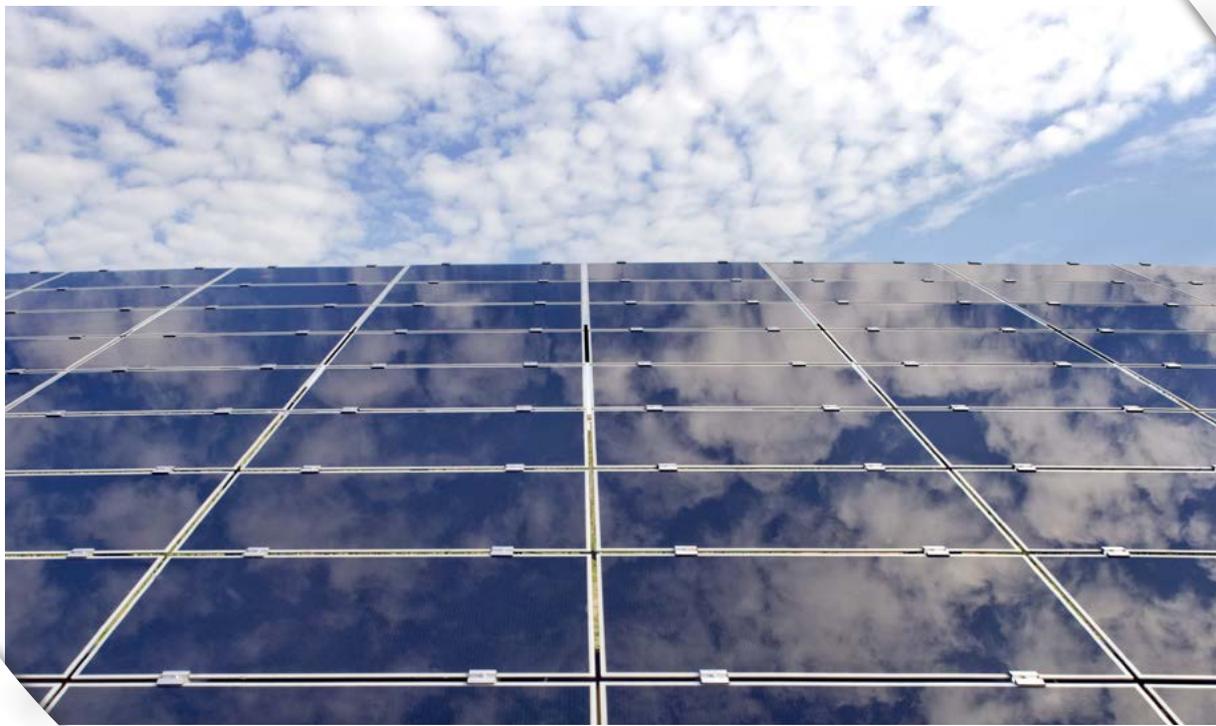
notamment les pays les plus riches, où les prix de l'électricité sont élevés. Il serait dans ce cas rentable d'installer des panneaux photovoltaïques sur votre toit pour réduire les consommations d'électricité. On se retrouve alors dans la situation d'effet de réseau négatif déjà évoquée. C'est toutefois ce qui va se produire si les responsables politiques ne décident pas, par exemple, d'appliquer une nouvelle fiscalité sur le photovoltaïque.

J'en veux pour preuve que cette semaine, le magasin IKEA de Southampton s'est lancé dans la vente de systèmes photovoltaïques. Ce phénomène va prendre de l'ampleur, car nous n'avons plus besoin de systèmes de subventions complexes et sensibles d'un point de vue politique. Vous pouvez réellement économiser de l'argent en installant quelques cellules photovoltaïques sur votre toit. Nous vivons une période très intéressante et je doute que qui que ce soit comprenne réellement ce qui va se passer dans les années à venir. C'est parce que nous aurons dépassé le stade de la subvention.

Cela peut avoir un impact considérable sur les opérateurs historiques en électricité. En Allemagne, le photovoltaïque produit déjà 35 GW. Si la tendance à la croissance se maintient, cette source d'énergie rognera sur les bénéfices de ces opérateurs. Ils doivent s'adapter et faire évoluer leurs modèles économiques. Cette situation n'a pas que des aspects négatifs, puisqu'elle ouvre également des opportunités.

Un secteur représentant mille milliards de dollars attend que des entrepreneurs s'en emparent. Les services publics disposent d'une clientèle conséquente, il est donc assez naturel qu'ils se lancent sur le marché. C'est ce que font certains d'entre eux, tels que Enel Green Power and Duke Energy aux États-Unis. Il existe des exemples de services publics qui ne luttent pas contre la nouvelle tendance, mais qui au contraire l'adoptent.

Nous devons garder le dernier point à l'esprit. Les énergies renouvelables sont déjà une technologie de choix en zone rurale. Lorsque vous n'avez accès à aucun réseau, le photovoltaïque est moins cher que les générateurs diesel. Nous devons surmonter certains obstacles, notamment financiers et réglementaires. Quoi qu'il en soit, il s'agit de la technologie la plus intéressante actuellement, aussi j'espère que nous pourrions proposer un accès universel d'ici 2030. Je ne me lancerai pas dans des prévisions sur la taille du marché, car je ne tiens pas à être cité lors d'une conférence dans 5 ans.



Centrale solaire photovoltaïque dans la banlieue de Narbonne

Crédit photo© : Laurent Migaux/MEDDE-MLETR

## SESSION I - PARTIE I

## Quels développements scientifiques et techniques des énergies renouvelables et quelles perspectives pour les filières industrielles aux horizons 2030 et 2050 ? - Energies solaires et éoliennes

Président de session

**Daniel LINCOT**

Directeur de recherche au CNRS

Il y a quarante ans, en 1973, la conversion photovoltaïque terrestre était pratiquement inexistante et la conversion éolienne à ses tout débuts. Aujourd'hui, ces deux sources d'énergie renouvelables sont devenues des sources majeures d'approvisionnement électrique et sont au cœur de ce que l'on appelle la transition énergétique, la troisième révolution industrielle, ou même la révolution énergétique en cours au niveau mondial. L'espoir de 1973 s'est ainsi transformé en réalité. Le chemin parcouru a été considérable. Cette session est l'occasion d'accueillir les témoignages d'acteurs clés et pionniers de ces domaines, qui pour-

ront faire le point sur les avancées scientifiques et techniques et jeter les bases d'analyse des évolutions à venir. J'ai le plaisir de vous présenter Richard Swanson, qui vous présentera la filière photovoltaïque au silicium, Ayodhya Tiwari, pour la filière photovoltaïque des couches minces et Masafumi Yamaguchi pour le photovoltaïque à concentration. Gilles Flamant vous présentera les développements dans le domaine du solaire thermique à concentration. Puis nous traiterons le domaine de l'énergie éolienne avec Preben Maegaard et Georges Kariniotakis.

### I. Énergie solaire

#### LA FILIÈRE SILICIUM

**Richard SWANSON**

Fondateur de Sunpower, États-Unis

C'est un grand plaisir d'être parmi vous aujourd'hui. Je vais tenter de passer en revue 40 ans de progrès dans le photovoltaïque, mais je dispose de très peu de temps. L'année 1973, que nous célébrons aujourd'hui, était idéale pour les cellules solaires. C'est à cette époque que j'ai démarré ma carrière dans le photovoltaïque et je vais vous décrire la situation que j'ai connue. Nous avons hérité des cellules solaires en silicium du secteur spatial et les premières sociétés commercialisant ces cellules pour une utilisation terrestre commençaient à voir le jour.

Nous raffinons le silicium pour obtenir la substance la plus pure qui soit à cette époque, et qui l'est d'ailleurs toujours aujourd'hui. L'opération coûtait environ 300\$ par kilogramme. Nous formions ensuite des cristaux parfaits, les plus gros que l'Homme ait jamais produits. Nous obtenions ainsi des lingots de silicium d'environ 3 pouces de diamètre. Nous coupions ensuite ces lingots en tranches, comme avec une trancheuse à charcuterie. Il fallait plusieurs minutes pour obtenir une tranche. Nous les transformions alors en cellules solaires produisant chacune environ

0,5 W. La fabrication d'un module coûtait à cette époque environ 100 \$/W et l'intégration à un système environ 200 \$/W. Il y avait encore un long chemin à parcourir pour que le photovoltaïque constitue une énergie terrestre propre et rentable.

Mais le marché a commencé à se développer, principalement dans le cadre d'applications à distance. Nous avons suivi la croissance du marché année après année. Plusieurs périodes se sont succédées, la première étant la période d'innovation avec la naissance des premières entreprises du secteur. Les compagnies pétrolières ont ensuite pris le relais. Elles ont soutenu le secteur malgré les pertes et entretenu le rêve.

Le programme photovoltaïque japonais a marqué un tournant avec un projet original visant à installer des panneaux solaires dans le désert et à acheminer l'énergie vers les villes. Ce n'était peut-être pas l'idée du siècle. L'atout unique de cette énergie est que vous pouvez la produire là où vous en avez besoin, sur votre toit. Le lancement du programme japonais a créé sur le marché une dynamique qui a amené les sociétés japonaises à dominer le secteur.

Les Allemands ont ensuite mis en place le programme de tarifs d'achat en 1999, que vous connaissez déjà. Cette mesure a engendré une croissance explosive du marché. Les sociétés ont compris que le secteur était prêt à recevoir les investissements des entrepreneurs. Les premiers investissements ont donc été réalisés en Allemagne, dans des sociétés telles que Q Cells. La croissance s'est poursuivie.

Revenons d'ailleurs sur la prévision de PHOTON Consulting évoquée tout à l'heure, qui tablait sur 13 GW en 2010. Il n'a pas été dit en revanche que cette prévision était de loin la plus optimiste de l'époque. La communauté a accueilli cette prévision de Michael Rogol avec incrédulité alors que dans les faits, nous avons atteint 30 GW en 2010. Lorsque nous avons sauté le pas et créé ces marchés, les coûts ont baissé. La courbe d'apprentissage a été mesurée. En 1979, on a commencé à obtenir de très bonnes mesures corrigées en fonction de l'inflation, à environ 34 \$/W. Ce prix est aujourd'hui de 0,85 \$/W.

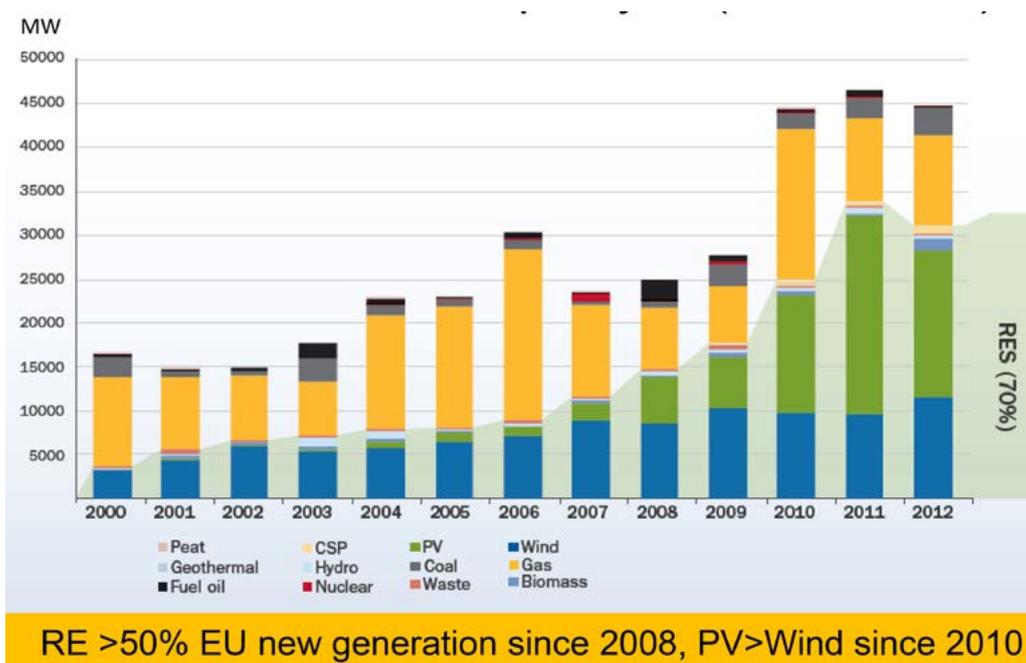
La croissance a été phénoménale. Le point de 100 GW a été atteint l'année dernière, ce qui a constitué une étape importante pour notre secteur. La pénétration des énergies renouvelables sur les marchés européens a été établie autour de 70 %. Je ne vais pas m'attarder sur le sujet, mais il faut bien réaliser que c'est une performance remarquable à tout point de vue.

Pour conclure, je vais me concentrer sur l'avenir. Le prix et le coût de fabrication des panneaux solaires ont fortement baissé. Les coûts de fabrication ont chuté de 50 % entre 2011 et 2013, principalement du fait d'une production à grande échelle. Cette chute a permis de construire des usines plus grandes et plus automatisées, et ainsi de gagner en efficacité et en présence dans la chaîne de valeur. Cela a entraîné une baisse générale du coût du verre et des autres matériaux.

La question qui se pose, c'est comment ces coûts vont-ils évoluer à l'avenir ? Greentech Media prévoit une baisse des coûts de fabrication à 0,36 \$/W d'ici 2017. Une analyse détaillée permet pourtant de tirer une observation intéressante. Les baisses mentionnées précédemment sont le fait d'économies d'échelle tandis que les baisses anticipées seront réellement dues aux avancées technologiques. La cellule solaire de base fabriquée sur cette période de 40 ans est restée relativement stable.

La société Solar Technologies International fondée par Bill Yerkes est un exemple intéressant. Elle a été l'une des premières à commercialiser des cellules solaires, dont le rendement était de 14 % en 1975. Shell a racheté Siemens Solar et commencé à produire des cellules similaires à celles de Solar International. La société est devenue Arco Solar, fusion de Siemens Solar et Shell Solar. La cellule était globalement la même et son rendement était passé à 14,5 %. Nous avons ce que nous pourrions qualifier de cellule solaire générique. Tout cela change à présent et les nouvelles technologies vont considérablement améliorer le rendement des cellules solaires et réduire leurs coûts.

J'ai mon point de vue à ce sujet. Il existe une cellule solaire générique très courante. Trois approches sont possibles. Toute la nouvelle capacité qui viendra remplacer la capacité en excès et obsolète d'aujourd'hui sera issue de l'une des technologies suivantes très performantes. Premièrement, les cellules à contacts arrière intégral développée par Sunpower, mais aussi la cellule HIT initialement créée par Sanyo. La cellule Pearl développée par l'Université de Nouvelle-Galles du Sud a également été largement adoptée par un grand nombre d'entreprises qui ont adapté cette cellule pour l'intégrer à leur processus de fabrication.



Source: EWEA, 2013

Nouvelles capacités installées en Europe

Les coûts vont continuer à baisser au cours des prochaines années du fait des progrès technologiques. Il y aura de nombreuses autres évolutions, notamment au niveau de la structure des cellules.

Dans tous les cas, les acteurs du secteur sont convaincus que d'ici 2020, les coûts de fabrication

des modules seront compris entre 0,35 et 0,45 \$/W. Cela signifie que nous aurons atteint les objectifs du programme américain SunShot et que le photovoltaïque sera l'une des options énergétiques les moins coûteuses au monde. J'en ai terminé et je vous remercie pour votre attention.

## LES FILIÈRES COUCHES MINCES

### Dr Ayodhya TIWARI

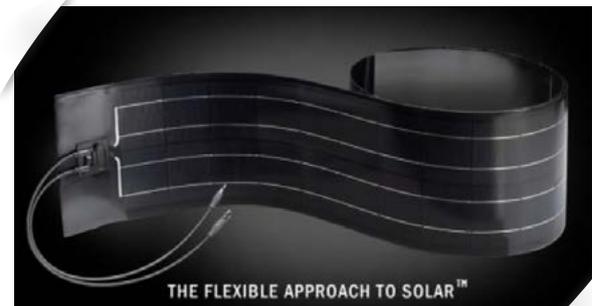
*Laboratoire des couches minces et photovoltaïque de l'Empa (Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche) de Zurich, en Suisse*

Je vais vous présenter dans les grandes lignes les progrès réalisés dans les technologies des couches minces par rapport à la technologie classique des tranches de silicium. Une technologie de nouvelle génération est en train de voir le jour. C'est pourquoi l'objectif sera toujours d'améliorer le rendement et de réduire les coûts.

Le domaine du photovoltaïque ressemble à un magnifique champ de fleurs. Il propose une grande diversité de technologies et d'opportunités. Ce n'est pas comme choisir entre une pomme et une banane. Si vous choisissez la pomme, cela ne signifie pas que la banane n'est pas bonne. Toutes ces technologies offrent de formidables opportunités et de nombreux défis à relever. Les scientifiques peuvent faire des choix, mais au bout du compte le succès commercial doit être au rendez-vous. Les technologies commerciales peuvent proposer des exclusivités et des avantages pour certaines applications. Nous avons choisi de travailler sur les couches minces. Elles sont principalement de types CIGS (diséléniure de cuivre d'indium et de gallium) et cdTe (tellurure de cadmium).

Ces technologies peuvent atteindre un rendement de 30 %. Elles ont déjà démontré des performances stables sur le long terme. Plusieurs méthodes rentables et différents matériaux sont disponibles pour produire ces dispositifs. Il existe des modules solaires extrêmement sûrs. Ils ne représentent aucun danger pour l'environnement et la santé, notamment la technologie au tellurure de cadmium. Cette technologie fait souvent débat. Certes le cadmium est toxique, mais le tellurure de cadmium est un matériau extrêmement stable. Vous pouvez imaginer la différence entre le sel de table, le sodium élémentaire et le chlore.

De ce fait, certains pensent parfois que les technologies des couches minces sont dans une impasse, car elles existent depuis 20/30 ans tandis que d'autres pensent qu'elles progressent. En ce qui me concerne, je pense qu'elles évoluent dans les bonnes directions. Pour proposer une électricité peu coûteuse, nous devons améliorer le rendement. Du point de vue du système, vous ne pouvez pas avoir des coûts de



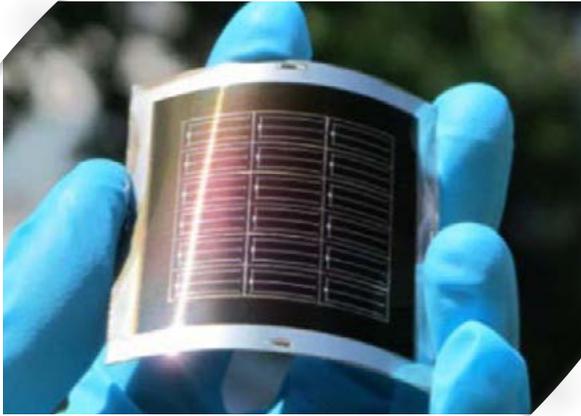
production et un rendement bas. L'équilibre des coûts du système est un élément essentiel. Il est même parfois plus important que le coût des modules solaires. Il faut se placer du point de vue du système.

L'une des caractéristiques principales de la technologie de couches minces réside dans le faible investissement requis pour équiper les usines. Il faut utiliser des matériaux ou des concepts à bas coût qui génèrent des dépenses d'investissement comparables à celles des technologies à base de tranches de silicium. Il faut ensuite travailler sur l'apport de valeur ajoutée. Les technologies des couches minces offrent de nombreuses opportunités d'intégration. Ces technologies doivent ensuite être mises en œuvre, ce qui nécessite des données de rentabilité et de fiabilité.

Je vais tout d'abord vous présenter le résumé d'un audit. Les technologies des couches minces permettent de produire des cellules à haut rendement de 19 à 20,4 %. Le rendement des modules de grande taille les plus efficaces est compris entre 15 et 17 %. L'application de couches minces sur de grandes surfaces offre certains avantages par rapport aux tranches de silicium qui expliquent les faibles coûts. Il est très facile de couvrir des surfaces avec les méthodes de dépôt de couches minces. Il y a également des avantages liés à l'intégration au système et au bâti.

Je ne vais pas entrer dans les détails, mais lorsqu'on parle de cellules solaires en couches minces, il est question de couches multiples. Il y a 4 ou 5 couches pour une épaisseur totale de 4 à 5 microns. À titre de comparaison, un cheveu humain fait 50 microns d'épaisseur.

On parle d'une valeur qui représente environ un 10<sup>e</sup> de l'épaisseur d'un cheveu humain et qui contient toutes ces cellules solaires. C'est un véritable défi, qui doit être relevé à très grande échelle et à très bas coût. Au niveau des technologies, plusieurs laboratoires interviennent. Je ne vous demande pas de tous les mémoriser, mais sachez que plusieurs d'entre eux ont obtenu des rendements compris entre 18 et 20 % en utilisant la technologie des capteurs solaires à tube sous vide et des méthodes à faible coût. Ces méthodes ont également permis d'obtenir des rendements de 12 à 15 % en laboratoire.



À l'échelle industrielle, plusieurs fabricants internationaux travaillent sur différents types de technologies. Cela illustre bien le caractère mondial du secteur. Il ne s'agit pas simplement de l'excellence d'une société ou d'un pays. En moyenne, plusieurs sociétés sont capables de créer d'excellents modules de grande taille offrant un rendement de 15 à 16 %. Des sous-modules de 30 x 30 cm voire moins ont atteint des taux de rendement de 17 à 18 %.

Il y a donc clairement un progrès. Aujourd'hui, la moyenne industrielle est quelque peu inférieure. Mais les résultats actuels montrent qu'il est possible d'atteindre 18 %, ce qui correspond au niveau de référence du marché. La technologie basée sur les tranches de polysilicium domine le marché. Je vais citer pour exemple le cas de la société japonaise Solar Frontier. Elle prévoit d'installer une usine produisant 1 GW et ses modules actuels ont un rendement de 13 %. Si vous regardez le rendement de ses cellules, elle est en réalité plus proche de 20 %. Cela laisse entrevoir un bel avenir pour cette société.

La technologie basée sur le verre a atteint un stade de maturité très avancé. Le remplacement du verre par des feuilles, de métal ou de plastique par exemple, offre plusieurs avantages, notamment au niveau de la fabrication. Il est en effet possible d'utiliser le procédé de déposition sur rouleaux, qui a révolutionné l'emballage alimentaire. Si vous ouvrez un paquet de chips, l'emballage est uniquement constitué de plastique recouvert de feuilles. L'opération est effectuée par des machines très compactes à très

haute vitesse. Il est possible d'adapter ces types de technologies à la fabrication de cellules solaires, bien que cela soit compliqué. Si on y parvient, on pourra baisser les coûts.

Le deuxième point consiste à réduire le coût des modules solaires, mais aussi à équilibrer les coûts du système. Ces modules solaires sont légers et se roulent, ce qui permet diverses applications. Les coûts de transport sont moins élevés. Cela ouvre différentes opportunités qui peuvent conduire à une baisse globale des coûts.

Le point essentiel combine quatre éléments : flexibilité, légèreté, faible coût et haut rendement. C'est dans cette direction que travaille notre laboratoire. Au cours des 12 dernières années, nous avons amélioré le rendement des cellules solaires flexibles, les portant d'environ 8 % à 20,4 %, une valeur record obtenue récemment grâce à des travaux de recherche méthodique. Sur les 18 derniers mois, le rendement est passé de 17 à 20 %.

Si nous comparons les possibilités dans ce domaine, le rendement de 20,4 % de la technologie CIGS flexible correspond aux 20,4 % atteints en 2004 avec le polysilicium. En revanche, le potentiel de cette technologie se situe clairement au-delà de 32 %. Ce chiffre me semble réaliste si l'on poursuit la recherche. En unissant nos efforts à ceux d'autres groupes, nous disposons des connaissances nécessaires. Le groupe de Daniel Lincot travaille également dans ce domaine et a déjà contribué à plusieurs reprises à des modifications matérielles innovantes des interfaces. Si nous mettons en œuvre toutes les idées, je suis persuadé que nous pourrions bientôt développer des cellules solaires épaisses d'un rendement de 25 %. Ce ne sera pas dans les trois années à venir, mais une feuille de route sera probablement tracée pour rendre cette avancée possible.

Le tellurure de cadmium constitue également une technologie très efficace en termes de coûts de production. First Solar a déjà mis en œuvre cette production. Le coût de fabrication le plus faible tourne autour de 0,68 \$/W. Pendant l'année écoulée, le rendement du dispositif a fortement augmenté, passant d'environ 16 % à près de 20 %, 19,6 % pour être exact, et cet exploit a été réalisé par General Electric (GE).

Cela prouve une nouvelle fois que les technologies des couches minces CdTe peuvent atteindre un rendement de 20 % dans un avenir proche. Nous effectuons également des recherches, mais davantage d'ordre universitaire cette fois. L'objectif est de trouver des concepts et des idées qui nous permettraient de développer des dispositifs plus efficaces et moins coûteux. Si je devais résumer rapidement la technologie au tellurure de cadmium, je dirais que les cellules ont déjà atteint un rendement de près de 20 %. Le rendement du module le plus performant est de 16,1 %.

L'application de cette technologie au plan de production industrielle est synonyme de progrès. Nous pourrions alors profiter à la fois d'un coût de fabrication très bas et d'un rendement élevé.

Un rendement de 20 % a été obtenu en laboratoire. Les progrès réalisés sont encourageants et la prochaine étape technologique permettra de mettre

en œuvre davantage de nouveaux matériaux et de nouveaux concepts. Les cellules solaires légères et flexibles peuvent probablement fournir également de l'énergie. Dans les habitations en zone rurale qui ne peuvent pas supporter des structures lourdes, les modules solaires légers pourraient servir de sources d'énergie.

## LE PHOTOVOLTAÏQUE À TRÈS HAUTE CONCENTRATION

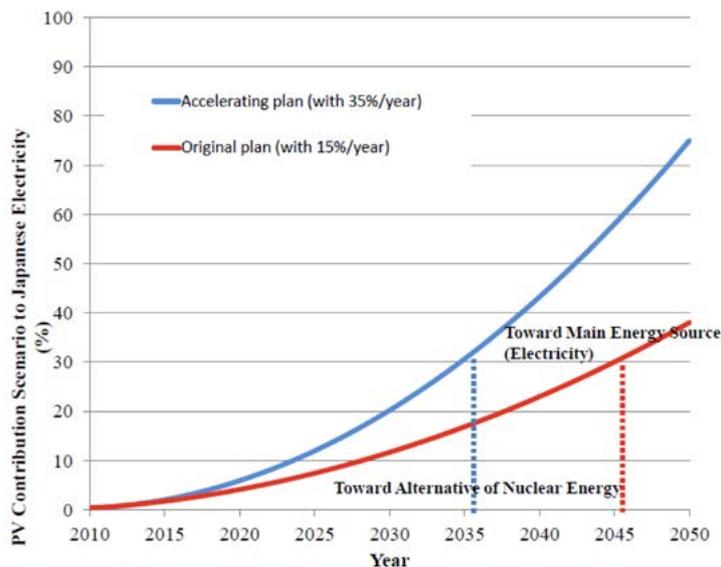
**Masafumi YAMAGUCHI**

*Directeur, Toyota Technology Institute, Japon*

J e vais vous parler de la situation depuis la catastrophe nucléaire de Fukushima, les particules nucléaires se déplacent dans l'air. Dans la région de Tokyo, le niveau de radiation a augmenté dans les jours suivant la catastrophe. Depuis, la situation s'est améliorée avec un retour à la normale. Le niveau de radiation global reste tout de même plutôt élevé.

du photovoltaïque à concentration à haut rendement. La technologie de cristallisation sera très importante pour l'emporter face au nucléaire dans le pays.

L'énergie solaire est celle qui offre le meilleur potentiel par rapport aux autres énergies et aux sources d'énergie actuelles qui utilisent des cellules.



**Scenario of photovoltaic (PV) contribution to Japanese electricity generation and to alternatives of nuclear energy**

Voici les niveaux actuels. Ils ont été mesurés à 500 m des réacteurs, à 30 km de Namie et 40 km d'Iwaki. Le niveau de saturation est atteint en raison de la demi-vie de 30 ans du césium 137. Pour observer une diminution du niveau de radiation, il faudra attendre plus de 100 ans, ce qui est extrêmement long. Cela signifie qu'un nettoyage de la contamination radioactive est nécessaire. Dans le pire des cas, l'opération coûtera mille milliards de dollars. La situation est donc délicate.

Le gouvernement japonais mettra fin au nucléaire fin 2030, voire fin 2040 selon ce scénario. Malheureusement, le Japon est déjà en train de préparer sa nouvelle politique nucléaire. En ce qui concerne l'avenir, j'espère que le photovoltaïque pourra atteindre des bas coûts et un rendement élevé, en particulier dans le cas du développement

Pour surmonter les problèmes liés au nucléaire au Japon, nous nous sommes fixés un objectif de 100 GW installés d'ici 2030, soit 10 % de la consommation nationale d'électricité. Mais si nous accélérons le rythme des installations de systèmes photovoltaïques de 15 à 30 %, nous pourrions compenser l'arrêt des centrales nucléaires d'ici 2040 et donc renoncer à l'installation de nouvelles centrales.

Nous avons établi la feuille de route actuelle, qui inclut l'accélération des plans. Nous nous tournons vers des alternatives au nucléaire et vers les principales sources d'énergie. Pour atteindre cet objectif, nous devons développer une technologie énergétique intelligente via l'étude systématique des énergies vertes. Nous devons étudier la production d'énergie, le contrôle du réseau énergétique et d'autres technologies.

Le photovoltaïque à concentration est un autre exemple de développement technologique. Des sociétés japonaises et espagnoles leaders ont mené des recherches collaboratives dans ce domaine. Environ 14 membres se sont joints aux dernières réunions. Le photovoltaïque à concentration offre un solide potentiel, avec des économies d'énergie de plus de 50 à 60 %.

Nous travaillons avec sept partenaires européens, parmi lesquels figurent IES/UPM (Instituto de Energia Solar/Universidad Politécnica de Madrid), l'Imperial College, l'Institut National de l'Energie Solaire (INES). Nous avons également neuf partenaires japonais, dont l'Université de Tokyo, SHARP, AIST et d'autres institutions. Dans le cadre de ce projet, mon étudiant en doctorat, Dr Takamoto et son collègue viennent d'atteindre un rendement de 37,9 % selon la méthode classique et 44,1 % selon la méthode à concentration.

Le Fraunhofer Gesellschaft Institute, en collaboration avec Soitec et le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), a établi un nouveau record mondial pour une agence, en atteignant un rendement de 44,7 % en concentrant environ 300 fois l'énergie du soleil. À l'avenir, nous serons capables de dépasser les 50 %. Ce chiffre illustre la croissance du photovoltaïque.

Les installations photovoltaïques à grande échelle seront particulièrement attrayantes à l'avenir. Cela signifie que les technologies photovoltaïques à concentration haut rendement et au silicium cristallin seront elles aussi très prisées. Je tiens à faire un commentaire. En poursuivant l'utilisation du nucléaire, nous transmettrons aux générations futures un héritage empoisonné. C'est pourquoi le photovoltaïque est si important. Je vous remercie de votre attention.

## LE SOLAIRE THERMODYNAMIQUE

**Gilles FLAMANT,**

*Directeur du laboratoire PROMES, CNRS, Odeillo, France*

J'aimerais rendre hommage à Félix Trombe et Marc Foex, les fondateurs du grand four solaire d'Odeillo, d'une capacité de 1 MW. Ils ont été les pionniers de l'énergie solaire concentrée en France. La période 1973-1985 a été fructueuse. En revanche, la période 1986-2003 a été plus difficile du fait de l'absence de recherche sur l'énergie solaire concentrée en France, avant une reprise.

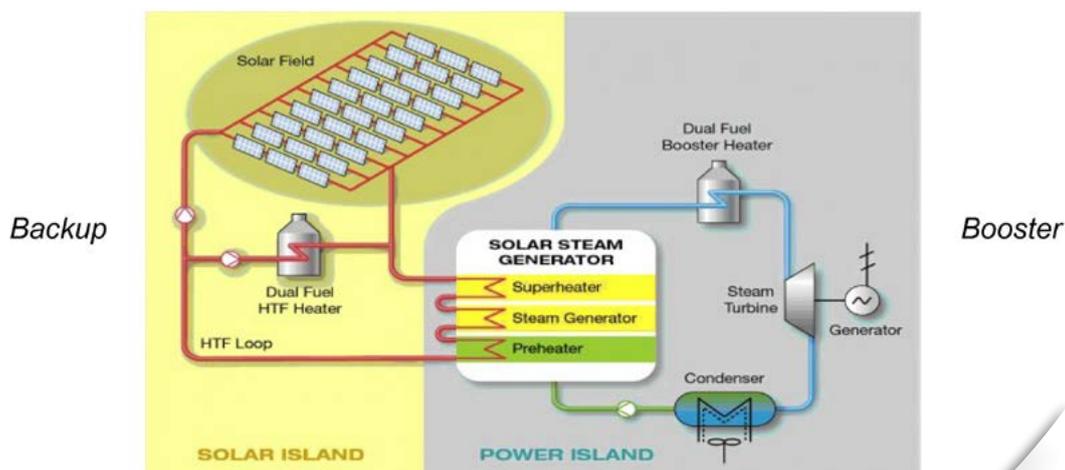
Les systèmes à concentration sont constitués de 2 catégories : les concentrateurs linéaires et les systèmes de focalisation sur un point. Le facteur de concentration des concentrateurs linéaires est inférieur à 100 tandis que celui des systèmes de focalisation sur un point est supérieur à 1000. La concentration solaire permet de produire et de traiter de l'électricité et des combustibles synthétiques.

Il y a deux points clés spécifiques. Le premier est que vous pouvez fournir de l'énergie et de la puissance de façon fiable et sûre, en fonction de la demande, grâce au stockage thermique et à l'hybridation. Mais l'inconvénient est que les systèmes à concentration utilisent uniquement le rayonnement solaire direct ce qui limite le domaine de développement à certaines régions.

Je vais me concentrer sur le stockage thermique et l'hybridation.

Le stockage thermique est parfaitement adapté à la production d'électricité à la demande. Une centrale équipée d'un dispositif de stockage peut produire de l'énergie le matin et après le coucher du soleil.

### Two modes of hybridization : Backup and Booster



Quant à l'hydratation, deux options méritent notre intérêt : l'hybridation de secours, dans laquelle l'installation utilise du combustible classique ou renouvelable pour alimenter le réseau en l'absence d'énergie solaire, et l'hybridation de suralimentation, qui permet d'augmenter le rendement du cycle thermodynamique avec une faible quantité de combustible.

Deux exemples illustrent ces deux options. Les centrales SEGS, installées aux États-Unis utilisent du gaz pour l'alimentation de secours, quantité limitée à 30 %. La centrale Shams I d'Abou Dabi, qui produit 100 MW, utilise quant à elle la technologie de suralimentation.

Je vais maintenant évoquer les tendances. Les centrales solaires à concentration sont une technologie relativement récente. Fin 2013, ce secteur produisait seulement 2,5 GW. Nous pouvons espérer atteindre 8 GW fin 2015. En Europe, le développement commercial de cette technologie est limité à l'Espagne. Il est également assez avancé aux États-Unis et fait ses débuts dans de nombreuses autres régions du monde, notamment au Moyen-Orient, en Afrique du Nord et

en Australie. La tendance est également à l'augmentation de la capacité des unités et à la construction de fermes de centrales solaires à concentration. Par exemple, la centrale Solana, qui vient d'être mise en service, dispose d'une capacité de 280 MW. La centrale américaine d'Ivanpah est une ferme solaire d'une capacité de 390 MW constituée de 3 unités.

Voyons maintenant les défis. L'objectif est de produire 10 % de la consommation mondiale d'électricité d'ici 2050. Tout d'abord, nous sommes en bonne voie pour apporter une nouvelle réponse à la problématique du rendement électrique de l'énergie solaire. L'objectif est de faire passer le rendement maximal de 20 à 30 % grâce aux nouveaux cycles thermodynamiques. Les autres défis concernent (1) le développement de nouveaux supports et systèmes de stockage, (2) le renforcement de la pénétration technologique grâce à l'hybridation et (3) la démonstration d'une technologie solaire très développée pour réduire les coûts. Je vous remercie de votre attention.

## II. Énergie éolienne

### ENERGIE ÉOLIENNE AU DANEMARK ET TRANSFERT DE TECHNOLOGIE

**Preben MAEGAARD**

*Directeur du Folkecenter for Renewable Energy, Danemark*

**M**a présentation sera axée sur l'expérience danoise, mais aussi sur le transfert de technologie. L'énergie éolienne est une technologie très prometteuse qui compte parmi les solutions d'avenir les plus importantes, mais comment a-t-elle acquis ce statut ?

C'est aujourd'hui une technologie standard, et le monde entier est équipé de la même éolienne à trois pales. Le Danemark a été un pionnier dans le développement de ce dispositif.

L'énergie éolienne est bien connue et utilisée depuis des milliers d'années. Elle a été particulièrement sollicitée en temps de guerre, puis lorsque les ressources de carburants fossiles se sont raréfiées. Les premières éoliennes électriques ont fait leur apparition à la fin du 18<sup>e</sup> siècle. Elles ont été mises en place dans trois pays quasiment simultanément autour de 1890.

Le pionnier au Danemark a été Paul la Cour, qui a très rapidement rendu l'électrification rurale possible dans le pays. C'est à lui que le Danemark doit sa longue tradition de l'éolien. L'étape suivante est le résultat de la conférence de Rome sur les sources nouvelles d'énergie qui s'est déroulée en 1961. Johannes Juul y a présenté son éolienne de Gesder, qui a constitué une avancée très importante. Ce concept est considéré aujourd'hui comme l'ancêtre des éoliennes danoises modernes.

L'éolienne de Tvind, qui était installée au sein d'un complexe scolaire, a elle aussi joué un rôle majeur. Elle a été construite dans le but de prouver que le Danemark n'avait pas besoin du nucléaire, ce qui allait dans le sens du plan gouvernemental de la fin des années 70. Le professeur allemand Ulrich Hütter a développé une technologie spéciale axée sur le raccordement des pales aux moyeux. Cette technologie a été transférée au Danemark par le biais des écoles de Tvind et la production d'une pièce spécialisée a démarré rapidement. Aujourd'hui, tout le monde peut acheter des pales auprès d'un fabricant spécialisé.

Il y a également la technologie hybride. L'éolienne de Gedser développée par Juul, avec sa structure très complexe et sa pale conçue par Ulrich Hütter, est devenue le concept danois. C'est ce modèle d'éolienne qui est utilisé aujourd'hui. Ces dispositifs sont assez lourds, installés face au vent et dotés de trois pales. Le premier modèle mis en service fut l'Asenkönig, suivi du Sumkönig. Le succès de l'éolien a depuis nécessité l'adaptation de ces éoliennes à trois pales.

Tout cela est décrit en détail dans notre ouvrage « Wind Power for the World : The Rise of Modern Wind Energy ».

Je vais décrire plus en détail le développement. Nous disposons aujourd'hui de grosses unités, mais elles utilisent la technologie de base de Juul et Hütter.

L'industrialisation est intervenue au début des années 80, lorsque Carter a ouvert le marché américain. Depuis, il y a eu des hauts et des bas aux États-Unis. Nous avons toutefois constaté des progrès à partir de 1991, lorsque l'Allemagne a adopté sa première loi sur les énergies renouvelables. Hermann Scheer en a été l'un des pionniers. Son intervention a permis d'améliorer la stabilité et le développement de la technologie.

La Chine est ensuite entrée en piste. Nous avons suivi attentivement le pays et observé ses avancées rapides. Il lui a en effet fallu 5 ans pour réaliser ce que les États-Unis ont mis 30 ans à accomplir. En 2010, la Chine s'est imposée comme leader, à la fois en termes de capacité installée et de capacité de fabrication.

Dans l'ouvrage intitulé « Wind Power for the World International Reviews and Developments » nous décrivons ce qui s'est passé dans de nombreux pays qui sont devenus des acteurs clés de l'énergie éolienne. La Corée a elle aussi effectué récemment des progrès majeurs avec des installations très imposantes. Le Japon se met à l'éolien, et même la Russie est présente. Le Canada est devenu un pays moteur du secteur. Quant au Brésil, c'est le pays dans lequel l'énergie éolienne est la solution la moins coûteuse. Les installations se trouvent dans le nord-est du pays, où les ressources éoliennes sont abondantes. L'énergie éolienne se développe dans de nombreux autres pays.

En Allemagne, pays leader en Europe et dans le monde, l'éolien couvre 23 % de l'alimentation en électricité. La Pologne s'est mise plus récemment à l'éolien et le développement de cette énergie en Espagne a connu des hauts et de bas, mais ce pays occupe une place importante dans ce secteur. La Suède a récemment développé sa production éolienne après avoir retardé l'échéance pendant de nombreuses années, malgré un référendum pour l'abandon du nucléaire en 1981.

La Turquie compte parmi les nouveaux acteurs de l'éolien, mais également la Communauté des États indépendants (CEI), ce qui laisse présager des solutions prometteuses. L'Égypte dispose de ressources éoliennes parmi les meilleures au monde. Le long de la mer Rouge, la vitesse médiane des vents est de 10 à 11 m/s. Le Maroc dispose également d'un solide potentiel avec ses ressources éoliennes très abondantes, ce qui devrait donner lieu à une nouvelle industrialisation dans la région.

En ce qui concerne la capacité éolienne, le Danemark détient la capacité installée la plus élevée, avec 752 W par habitant. L'Espagne et l'Allemagne sont respectivement à 567 et 381 W. Le Royaume-Uni apparaît en leader des sources offshore dont la capacité devrait atteindre 500 MW d'ici 2016 et 1 million de MW d'ici 2020.

Ce secteur fait l'objet d'une coopération internationale. Je ne vais pas entrer dans les détails, mais il semble que toutes les grandes sociétés ont établi des partenariats, ce qui permet des transferts de technologie entre les pays. Les grands opérateurs des secteurs traditionnels s'associent notamment à des acteurs mondiaux dans l'équipement éolien. Le numéro 1 de l'éolien Vestas (société danoise) et Mitsubishi ont créé la semaine dernière une société commune au Japon afin d'unir leurs efforts de développement. En ce qui concerne la construction, les pales sont de plus en plus grosses. Une petite société danoise a entamé une collaboration avec le Coréen Samsung pour produire la plus longue pale qui ait jamais existé. Celle-ci fait actuellement l'objet de tests et équipera un nouveau prototype d'éolienne. La longueur de cette pale équivaut à l'envergure des plus gros avions au monde.

La technologie sans multiplicateur se développe également. Alstom y travaille avec l'Espagnol Ecotecnia.

## ■ Enlarging of blades

*World's largest blade by SSP Denmark for Samsung, Korea*

- 83,5m – 30 tonnes
- 7 MW wind turbine
- lighter and stronger materials – carbon, epoxy



Source: <http://www.investindk.com>

Entre 1985 et 2009, le Danemark a pratiqué la décentralisation dans le secteur énergétique, que le gouvernement avait interdite en 1980. Des centrales classiques combinant uniquement chaleur et énergie ont été construites. Il est très important aujourd'hui d'intégrer de grandes quantités d'énergie éolienne pour le secteur du chauffage. Selon le gouvernement, cette énergie représentera 50 % de la production d'ici 2020 contre 33 % aujourd'hui. Ce secteur se développera aux dépens du charbon et des sources d'énergie traditionnelles.

Nous voyons que cet objectif sera atteint avec les éoliennes terrestres et offshore, mais que ces dernières coûtent deux fois plus cher. C'est pourquoi que je ne suis pas certain que l'éolien offshore, qui a le vent en poupe depuis quelques années, aura encore un rôle à jouer. Il est coûteux et le restera. L'énergie éolienne représente parfois moins de 10 % de l'énergie produite, mais il arrive qu'au Danemark, elle couvre 80 % de la demande en électricité. Cette situation n'est pas simple à gérer.

La première difficulté réside dans le fait que si la consommation d'énergie est prévisible, la production d'énergie éolienne et solaire est fluctuante. Que pouvons-nous y faire ? Nous avons déjà un aperçu. Les chiffres réels montrent que l'éolien couvre plus

de la moitié de la demande en électricité. Cela devient compliqué à partir de 50 %. Pour gérer cela, il faut utiliser l'énergie pour produire de la chaleur. C'est la solution privilégiée au Danemark, car la part de cogénération y est très élevée. Nous intégrerons la cogénération à l'énergie éolienne. Cela intervient dans un système d'équilibrage des énergies, avec une régulation à la baisse et à la hausse. C'est une grande chance pour nous que la cogénération soit si développée. La chaudière régule le surplus avec l'énergie éolienne.

La deuxième difficulté concerne l'acceptation sociale locale. Des centaines d'associations se sont constituées pour lutter contre les éoliennes au prétexte qu'elles défigurent le paysage. Nous pouvons surmonter cet obstacle par le biais de l'appropriation locale afin que la population locale soutienne ces projets. Une petite ville de la côte ouest va d'ailleurs recevoir un Prix solaire européen cette année, pour les résultats remarquables d'un projet qu'elle a mené. L'appropriation locale crée l'acceptation, qui donne elle-même naissance à de nouvelles initiatives, soutient l'économie locale et favorise le développement.

L'acceptation locale et la nouvelle économie sont pour moi les facteurs clés de la réussite future de l'éolien.

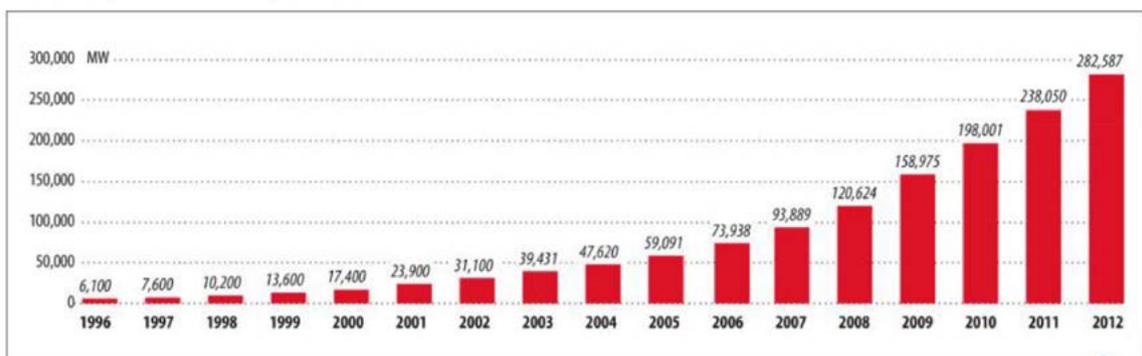
## LA FEUILLE DE ROUTE R&D POUR L'ÉOLIEN À L'HORIZON 2030/2050 EN EUROPE

**Georges KARINIOTAKIS**

Centre PERSEE, Mines Paristech, France

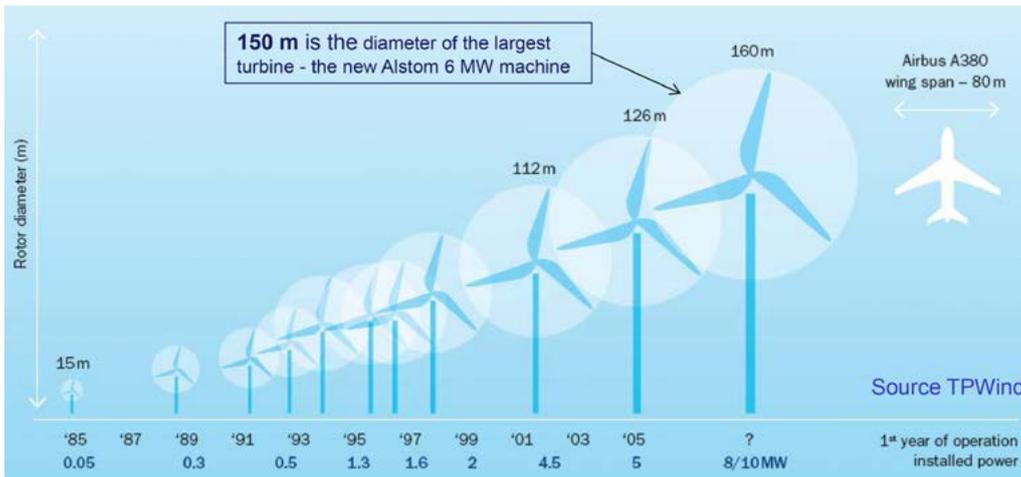
Je représente le Centre Procédés, Énergies Renouvelables et Systèmes Énergétiques de MINES ParisTech. Le PERSEE (anciennement CEP) est un centre de recherche qui s'intéresse aux énergies renouvelables depuis les années 70. Je suis présent aujourd'hui en ma qualité de membre du comité d'orientation de la plateforme technolo-

gique européenne pour l'énergie éolienne (TPWind), afin de présenter les perspectives de recherche et développement et la feuille de route aux horizons 2030 et 2050 pour le secteur de l'éolien en Europe.



Source: GWEC

225,000  
wind turbines



Je présenterai des informations importantes qui illustreront ce que le secteur éolien a apporté à l'humanité. Par exemple, il représentait 670 000 emplois dans le monde en 2011. Cela fait écho au sujet de notre conférence d'aujourd'hui, « Les énergies renouvelables au service de l'humanité ».

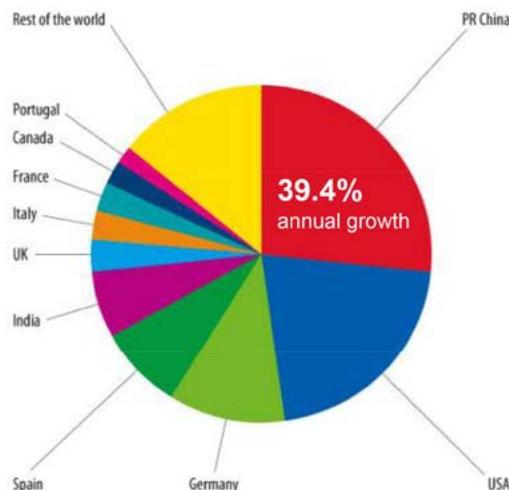
Je vais commencer par quelques mots sur l'évolution de la technologie des éoliennes. La plus grosse éolienne actuellement en service affiche un diamètre de 150 m et des projets prévoient des rotors encore plus imposants. La Chine occupe la première place en termes de capacité éolienne installée, avec une croissance de 39,4 % en 2012. En Europe, 109 GW ont été installés en 2012. La même année, la capacité éolienne installée dans le monde atteignait 282 GW. La France se classe cinquième en Europe et huitième dans le monde.

Lorsqu'on parle des énergies renouvelables et en particulier de la production d'énergie éolienne et solaire, on pense inévitablement à la nature variable de la production due à la dépendance aux conditions météorologiques. Ce problème génère un fort scepticisme sur l'intégration d'une production fluctuante aux réseaux d'électricité. Les systèmes d'alimentation n'ont pas été conçus pour prendre en

charge la production d'énergies renouvelables variables. Le meilleur moyen de convaincre les sceptiques est de leur citer des exemples concrets de pays affichant un taux élevé de pénétration des énergies renouvelables. J'ai ici les chiffres d'une journée de juin 2011 en Espagne, au cours de laquelle REE (Red Eléctrica de España), a constaté un taux de pénétration de l'éolien de 59,6 % à 22h. Ce chiffre représente la part de l'éolien dans la demande globale en électricité du pays. C'est la preuve que l'opérateur du réseau d'électricité peut faire fonctionner le réseau national avec une forte contribution de l'éolien. Nous voyons également que le lissage spatial dû à la distribution géographique des fermes éoliennes permet de lisser la production électrique éolienne sur la journée.

Il existe un exemple similaire pour le Danemark. Nous avons enregistré pendant une année les valeurs de pénétration horaire pour la région du Jutland. Nous avons observé qu'à certaines heures de l'année, la pénétration peut atteindre 100 %, voire plus. Lorsque c'est le cas, l'énergie est transférée aux systèmes voisins. La pénétration éolienne moyenne était de 20 % en 2007 alors que, l'objectif pour 2011 avait été fixé à 30 % de la consommation d'électricité.

□ Top 10 Cumulative Capacity (December 2012)



Europe (in MW)

Germany	31,308
Spain	22,796
UK	8,445
Italy	8,144
→ France	7,564
Portugal	4,525
Denmark	4,162
Sweden	3,745
Poland	2,497
Netherlands	2,391
Turkey	2,312
Romania	1,905
Greece	1,749
Ireland	1,738
Austria	1,378
Rest of Europe <sup>(1)</sup>	4,922
<b>Total Europe</b>	<b>109,581</b>

Autre exemple, en Allemagne cette fois : le 15 avril 2013, la pénétration des énergies renouvelables a atteint un niveau inédit de 40 % grâce aux énergies solaire et éolienne combinées. Il ne faut pas oublier les systèmes d'alimentation insulaires. La quantité d'énergie renouvelable variable qui peut être intégrée sur les îles suscite de nombreux débats, notamment en France. Actuellement, la limite de pénétration acceptable est de 30 %. Je vais vous présenter l'exemple de la Crète, une île grecque. Cette île est une sorte de pionnier des énergies renouvelables, dans le secteur du photovoltaïque et de l'éolien. Son système d'alimentation n'est pas interconnecté. Il est arrivé lors d'une journée que la pénétration atteigne 53 % de la demande totale de l'île.

En ce qui concerne l'avenir, j'aimerais souligner les objectifs « 20/20/20 » établis par la Commission européenne, qui se traduisent par une contribution de 20 % des énergies renouvelables à la consommation d'énergie finale d'ici 2020. Cela représente des objectifs particulièrement ambitieux pour l'éolien. Quels sont ces objectifs ? L'EWEA (Association Européenne de l'Énergie Éolienne) vise 230 GW de capacité éolienne installée d'ici 2020 pour couvrir 20 % des besoins européens en électricité, soit une augmentation considérable par rapport aux 109 GW actuels. L'objectif à l'horizon 2030 est de 350 GW, dont 150 GW offshore. Cette capacité devrait couvrir 33 % de la demande d'électricité en Europe.

L'éolien est un secteur mature qui a déjà prouvé sa capacité à répondre aux besoins. Mais pour atteindre ces objectifs ambitieux au cours des prochaines décennies, nous savons déjà qu'il nous faudra déployer des efforts de recherche, de développement et de démonstration pour réduire les coûts, l'impact sur l'environnement et les risques. La mission de TPWind, la plateforme technologique européenne pour l'énergie éolienne, est d'identifier les domaines de recherche dans l'éolien, de les classer par ordre de priorité et d'établir une feuille de route. La plateforme TPWind, qui a été lancée en 2006 par la Commission européenne avec de nombreuses autres plateformes, réunit 150 experts des secteurs industriel et universitaire.

L'objectif de ces activités de R&D est de réduire les coûts sociaux, environnementaux et technologiques de l'énergie éolienne. Les cinq domaines de recherche prioritaires suivants ont été identifiés : les conditions de vent (pour approfondir les connaissances sur la ressource elle-même), les systèmes de production d'énergie éolienne (des éoliennes aux fermes), l'intégration au réseau, la production offshore et les problèmes liés à l'environnement et au déploiement.

Nous avons établi le premier programme de recherche en 2008. Une mise à jour est en cours de préparation et sera publiée en mars 2014. Le budget total de R&D anticipé dans les années à venir pour la mise en œuvre de ce programme est de 6,1 milliards d'euros. Nous espérons que grâce à ce programme, nous pourrions

inciter la Commission européenne à intégrer les thèmes identifiés au programme Horizon 2020 ou à d'autres programmes. Des feuilles de route similaires sont actuellement développées au niveau national. En France, par exemple, l'ADEME a établi une feuille de route pour l'éolien en 2011.

Je vais rapidement énumérer les priorités identifiées dans la feuille de route de TPWind. Ces informations sont basées sur une version préliminaire de la feuille de route, car comme je l'ai indiqué précédemment, la version finale sera publiée l'année prochaine. Par exemple, il a été considéré comme prioritaire d'approfondir les connaissances sur la ressource éolienne en revoyant la chaîne de modélisation (à commencer par le système météorologique) et en incluant des modèles climatiques et des modèles de circulation du vent autour des éoliennes.



Parc éolien du Rochereau, Région Poitou-Charente

Crédit photo : Thierry Degen/MEDDE/MLETR

Il est intéressant d'explorer l'interaction du vent avec les grandes éoliennes modernes. Il est également important de pouvoir prévoir les conditions de vent et la production pour les minutes/heures ou les jours à venir, car si nous souhaitons intégrer de grandes quantités de vent, nous avons besoin de prévisions de qualité et d'estimations fiables. Une plus grande normalisation sera également nécessaire à l'avenir.

En ce qui concerne les éoliennes, nous avons besoin d'outils plus adaptés pour concevoir des machines plus fiables et donc moins coûteuses. Nous n'avons pas suffisamment de temps aujourd'hui pour détailler tous les domaines, mais je tiens à souligner à quel point il est important d'améliorer le fonctionnement des fermes éoliennes et leur raccordement au réseau. Nous devons travailler sur les contrôles de ces fermes et sur les normes de fonctionnement et de maintenance. Pour ce qui est de l'intégration au réseau, nous devons entre autres choses développer des méthodes qui nous permettront d'améliorer les capacités de production d'énergie éolienne. Les fermes éoliennes devront de plus en plus fonctionner comme des centrales traditionnelles, c'est-à-dire comme un « bon citoyen » du système d'alimentation.

Nous aurons également besoin de nouvelles technologies plus avancées pour une meilleure connexion au réseau et une meilleure transmission, ainsi que de nouveaux modèles économiques et de mécanismes adaptés pour le marché de l'électricité. Nous pourrions instaurer des marchés énergétiques mondiaux pour les énergies renouvelables variables. Les marchés n'ont pas été conçus pour fonctionner de cette manière jusqu'à présent. Si vous souhaitez en savoir plus, je vous invite à consulter la feuille de route 2008 sur le site Web de TPWind.

Pour conclure, j'aimerais insister sur le fait que, malgré la maturité de la technologie éolienne, nous savons que nous devons intensifier les efforts de R&D pour atteindre les objectifs ambitieux fixés aux horizons 2030 et 2050. L'objectif premier est de réduire les coûts de la technologie éolienne pour préserver le leadership et la compétitivité du secteur européen dans le monde. Je vous remercie de votre attention.

## SESSION I - PARTIE 2

## Quels développements scientifiques et techniques des énergies renouvelables et quelles perspectives pour les filières industrielles aux horizons 2030 et 2050 ? - Biomasse, énergies marines et géothermie

Président de session

**Alain DOLLET**

Directeur de recherche au CNRS pour la cellule Énergie.

Cette 2<sup>e</sup> partie de la session traite de ressources renouvelables moins connues du grand public que le solaire et l'éolien, mais qui représentent également un gisement considérable, et qui devraient occuper une place importante dans le futur mix énergétique mondial de 2030 ou 2050. Il s'agit tout d'abord de la biomasse : on parlera moins ici de la biomasse traditionnelle (c'est la plus forte consommation aujourd'hui, mais elle n'est pas vraiment renouvelable) que de la biomasse renouvelable, destinée en particulier à la production de biocarburants de 1<sup>re</sup>, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> générations. Les énergies marines seront ensuite évoquées, avec des exemples de développements récents en France concernant l'éolien offshore, ou les énergies hydrolienne et houlomotrice. Rappelons que la France

fut pionnière dans les énergies marines en mettant en service la grande usine marémotrice de 240 MW de la Rance ; c'était il y a près de 50 ans. Enfin, la dernière partie de la session sera dévolue à des présentations du développement de la géothermie en Europe et en France, qui montreront le potentiel des différentes technologies disponibles (différentes profondeurs et températures) pour cette filière sans doute moins à la mode que les précédentes et pourtant d'un grand intérêt compte-tenu de son efficacité et du caractère non-intermittent de la ressource. La session sera clôturée par une présentation de l'analyse prospective, et de l'éclairage qu'elle apporte quant à la possible évolution de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique.

### I. Biomasse et bioénergies

#### LES ÉNERGIES DE LA BIOMASSE : EFFICACITÉ, SOBRIÉTÉ, DIVERSITÉ

**Claude ROY**

Président du Club des Bio-économistes et membre du Conseil Général de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Espaces Ruraux (CGAAER)

La bioéconomie concerne la transformation de produits issus de la photosynthèse en aliments, matériaux, bases chimiques, fertilisants organiques et bioénergies. Elle est donc en fait à l'origine notamment, de formes très variées d'énergie, et elle représentera d'ici 2020 la deuxième ressource énergétique mondiale, derrière les fossiles et devant le nucléaire. Outre les matériaux et la chimie, la biomasse, à travers les bioénergies, débouche avec d'excellents rendements sur les marchés variés des carburants, des biogaz et syngas, de la chaleur et de l'électricité. Ces bioénergies permettent ainsi d'éviter et de remplacer en France près de 15 millions de tep/an de consommation d'hydrocarbures fossiles.

Vous verrez, comme aime le dire Pierre Radanne, que les visions d'un « pays plein » comme l'Europe ou les visions d'un « pays vide » comme le Brésil, n'ont pas grand-chose à voir entre elles.

Le « pays vide », comme le Brésil, a tout à conquérir et peut tout conquérir, presque sans limites. Nous, dans notre « pays plein » qu'est l'Europe, nous avons l'obligation d'être sobres et nous devons gérer les concurrences dans l'occupation des espaces et dans l'exploitation des ressources ! Et je n'oublie pas, puisque nous sommes en France, de rappeler que la biomasse est d'abord ce qui nous permet de manger, (et si possible de bien manger...). Nous avons à faire dans le monde « fini » qui s'annonce, à plusieurs grands défis critiques qui se situent tous à l'horizon du milieu du siècle : les ressources en eau, les ressources alimentaires et les ressources énergétiques devront d'abord affronter une population mondiale croissante et vieillissante de près de 10 milliards d'habitants. Sachez que d'ici 2050 par exemple, il nous restera par habitant, sur la planète, moitié moins de surfaces cultivables que ce dont on disposait en 1950.

Quant aux ressources énergétiques fossiles et fissiles, nos réserves représentent environ cinquante ans de consommation actuelle à 70 euros le baril. A tout cela s'ajoute un enjeu terrible, le changement climatique, enjeu face auquel nous n'avons que trois voies possibles pour se protéger et lutter : la sobriété, l'économie du renouvelable, et la séquestration du carbone. Quand on mesure ces enjeux-là, on s'aperçoit que la bioéconomie et la valorisation de la biomasse fonctionnent positivement dans chacune de ces trois voies. La bioéconomie est en effet une source majeure de sobriété, par sa production et ses produits. Elle valorise aussi, bien entendu, des bio-ressources renouvelables, et c'est le thème de ce colloque. La bioéconomie développe enfin, par nature, des puits de carbone à la production, dans les champs et les forêts, dans les sols et dans les bio-produits.

Oui, la bioéconomie est donc une véritable force de frappe et un amortisseur contre le changement climatique. C'est un exemple unique, et pourtant on en parle bien peu, d'autant qu'elle fournit en outre beaucoup d'emplois ; de l'ordre d'un emploi supplémentaire, comparé aux filières fossiles, par mille tonnes de biomasse produites et récoltées en vue de leur transformation en énergie, en chimie ou en matériaux. Non, on en parle peu décidément, et trop souvent on la critique, même, au nom d'une soi-disant « écologie » qui ne veut pas comprendre. Il faut dire, notamment, qu'une bioéconomie efficace signifie une agriculture et une sylviculture vivantes, dynamiques, et productives. Et il nous faut bien sûr, pour cela, des agriculteurs et des sylviculteurs professionnels et compétitifs qui soient capables d'assumer des objectifs de productivité tout en opérant des choix de production sobres et diversifiés. Vous savez bien que l'idée d'une agriculture et d'une sylviculture très productives, ce n'est plus politiquement ni « écologiquement » correct aujourd'hui, malgré les 10 milliards d'habitants annoncés sur Terre. On préfère le qualitatif et l'extensif, sans trop réfléchir aux énormes défis quantitatifs de la planète. On préfère mettre tous ces enjeux à naître de la démographie planétaire sous cloche et attendre le « choc du futur »... Danger !

Soyons durables et responsables, véritablement. Nous avons le devoir de mettre en valeur efficacement nos ressources, toutes nos ressources, notre agriculture et notre sylviculture face à la surpopulation planétaire annoncée. Car cette bioéconomie efficace sera alors un excellent rempart contre le changement climatique, comme nous l'avons vu précédemment, et qu'en plus elle nous fournira une excellente source de production renouvelable d'aliments, d'énergies, de molécules et de matériaux renouvelables etc., avec des emplois à la clé.

Cette bioéconomie, ces filières de la biomasse, sont évidemment beaucoup plus compliquées à comprendre et à « gouverner » que l'éolien ou le solaire par exemple, car elles sont beaucoup plus diversifiées, et surtout fondamentalement systémiques. Six types

de bio-ressources sont valorisées à savoir : les bio-déchets, les sous-produits cellulosiques, le bois, les cultures agricoles, les productions cellulosiques dédiées, la biomasse aquatique. Celles-ci alimentent huit grands types de marchés : les fertilisants organiques, l'alimentation, les matériaux, les néo-biomatériaux, la chimie, les carburants, la chaleur et les gaz, l'électricité.

Evidemment, tout cela se croise et se concurrence, quand par exemple ce sont des productions alimentaires qui vont à la chimie, ou du bois de construction qui finit en source d'énergie. Il faut donc chercher les synergies entre filières, c'est le cas notamment dans les bio-raffineries, et il faut penser aux hiérarchies d'usages et de valorisation des ressources. Mais on sait que l'on peut compter sur la variété de toutes ces bio-ressources renouvelables, imposantes et disponibles. Dans la plus grande partie des régions du monde, on mise sur des ressources énormes de déchets organiques, on travaille sur des ressources agricoles et agro-alimentaires encore sous valorisées, on remet en valeur des ressources considérables de sous-produits de la forêt et de la filière bois. Et l'on se tournera peut-être, demain, vers des ressources aquatiques ?

En face de toutes ces bio-ressources, il y a d'abord des filières utilisatrices non destructives, qui préservent la structure moléculaire de la biomasse et qui sont donc logiquement à privilégier. Ce sont principalement, avec le cas particulier de l'alimentation, tous les biomatériaux, les néo-matériaux fibro-composites, les bio-fertilisants, et la chimie du végétal. Toutes sont en plein développement. Mais il y a aussi bien entendu des filières destructives, énergétiques, qui détruisent la structure de la biomasse pour pouvoir la valoriser. Car la biomasse est une molécule, rappelons-le, et ce n'est pas en soi une énergie. Si l'on décide de transformer immédiatement cette molécule en énergie, on perd les avantages et les fonctionnalités de la molécule et de son utilisation (matériau, puits de carbone, valeur ajoutée, emploi). A l'inverse si l'on décide de transformer d'abord cette molécule en matériaux, on peut toujours la récupérer un jour comme matériau en fin de vie pour en faire de l'énergie. C'est ce que disent « les vieux », en montagne : « il ne faut jamais brûler son bois trop tôt ». C'est pourtant une chose que les énergéticiens ne comprennent pas bien, cette logique de choix durable en quelque sorte, car il faut dire que la notion même de puits de carbone (bio-absorption et bio-séquestration), absente du protocole de Kyoto, est elle-même rarement bien comprise en dehors des biologistes et des agronomes.

Il y a donc ainsi de multiples bio-filières dans la bioéconomie, énergétiques et non énergétiques. Elles sont toutes en pleine croissance. Disons qu'elles progressent globalement et grossièrement de l'ordre de 5 % par an, au niveau mondial et au niveau européen.

Le bois énergie thermique est connu, il est compétitif, et il est d'emploi massif. La bioélectricité coûte en revanche plus cher et reste limitée, car de faible rendement, et elle exige des tarifs d'achat bonifiés. La gazéification de masse sera peut-être opérationnelle dans dix ans, mais elle induira alors une véritable révolution dans les filières de valorisation de la biomasse, car on pourra faire à partir de cette technologie à peu près tout ce que l'on veut : des carburants, de la chimie, des gaz, de l'électricité... La méthanisation est et restera une petite filière, dédiée au traitement des effluents et des bio-déchets (à la différence de l'Allemagne), mais c'est une filière très « vertueuse » parce qu'elle s'adapte très bien aux territoires. Les biocarburants de première génération sont critiqués par des gens qui, en général, ne les connaissent pas. Je rappelle les qualificatifs calomnieux qui leur ont été décernés comme « nécro-carburants », ou « crime contre l'humanité » par des porte-voix aux motivations douteuses. Ces biocarburants sont en effet une excellente voie de substitution polyvalente et immédiatement disponible. Simplement, elle a ses limites, comme le pétrole et le gaz. Et rappelons qu'à côté des biocarburants de génération 1, il y a aussi, avec les mêmes molécules de base, toute la chimie de génération 1. Il y a aura peut-être un jour, dans dix ou quinze ans, (mais on en est encore très loin car les rendements sont cruellement insuffisants), la chimie et les biocarburants de génération 2 (à base de cellulose et de bois), voire même de génération 3 (à base d'algues). Il y a enfin tout le secteur des panneaux et des produits de construction, qui est un véritable enjeu de performance économique et énergétique pour nos constructions « à énergie positive ou à énergie passive », et pour tout ce qui concerne l'isolation extérieure des bâtiments et leur surélévation.

Considérons maintenant les chiffres globaux des bioénergies. Les filières de la bioéconomie fournissent 19 % de l'énergie finale mondiale. En réalité, ces chiffres sont un peu trompeurs car une grosse partie vient de ce que l'on appelle le bois à usage domestique, encore très répandu dans le tiers monde. Si l'on regarde les chiffres mondiaux, toutes énergies renouvelables confondues, c'est 5 % seulement de la consommation énergétique planétaire totale qui est fournie par du « renouvelable moderne » (solaire, éolien et biomasse). Mais si l'on regarde, d'après les chiffres de l'Agence Internationale de l'Energie, le devenir prévisible de la bioéconomie énergétique vers 2035, on voit quand même que les usages énergétiques de la biomasse vont s'accroître très fortement pour l'électricité, de plus 150 à 300 %. Ce ne sera pas le cas en France bien sûr, où la production de bioélectricité n'est pas prioritaire vu notre assise énergétique nucléaire. Pour la chaleur industrielle et collective, la croissance devrait atteindre +80 à +150 %, et pour les biocarburants enfin, elle serait de plus 250 à plus 700 %. C'est donc, malgré les polémiques, dans le domaine des biocarburants (et de

la chimie du végétal) que l'attractivité de la biomasse est la plus forte et la plus légitime parmi les Etats comme parmi les utilisateurs, car elle est la seule voie de substitution possible et tangible aux carburants fossiles et à la carbochimie.

Si l'on regarde ces bouquets énergétiques au niveau mondial, on découvre effectivement, non sans surprise, que dès aujourd'hui, et jusqu'en 2030, la biomasse sera et restera la deuxième source d'énergie mondiale, derrière les ressources fossiles, devant le nucléaire, assez largement devant l'hydraulique, et encore plus loin devant toutes les autres sources d'énergies solaires et éoliennes réunies dont on parle tant.

La place de la biomasse dans le domaine énergétique est donc très originale, car très variée, mais n'oublions pas à nouveau que la biomasse n'est pas seulement de l'énergie. C'est de l'alimentation, des matériaux, et de la chimie comme nous l'avons vu. La valorisation matière de la biomasse, rappelons-le, s'impose car elle vaut un double bénéfice : elle nous stocke d'abord du carbone à raison d'une tonne de CO<sub>2</sub> par tonne de biomasse, et elle constitue ensuite un réservoir ultime d'énergie à raison de 0,25 tonne équivalent pétrole par tonne de biomasse.

Pour la France, des feuilles de route énergétiques et climatiques ont déjà été tracées et elles sont très ambitieuses, surtout pour les valorisations de la biomasse. La bioéconomie représente aujourd'hui 5 % des parts de marché en approvisionnement pour les énergies, les matériaux et la chimie en France. Il faudra « doubler la mise » d'ici 2025 (Grenelle) et la quadrupler d'ici 2050 (Facteur 4). Voilà donc les feuilles de route qui engagent la France et la bioéconomie. Ces objectifs devraient reposer pour les deux tiers sur le bois et les ressources ligneuses, pour 30 % sur les produits et sous-produits de l'agriculture et pour 10 % sur les bio-déchets.

A côté de la filière bois classique, et à côté de l'agro-alimentaire classique, des nouvelles filières de la biomasse ont ainsi émergé en France depuis vingt à trente ans. Ces filières sont toutes jeunes, mais elles pèsent quand même déjà, dans notre pays, et représentent 1500 entreprises environ, 14 milliards d'euros de chiffre d'affaires et 70 000 emplois, pour 2Mds d'euros d'investissements annuels au moins. Ne les cherchez pas dans les documents statistiques de l'Etat sur l'innovation ou l'industrie, cela ne figure pas encore. Et cette économie très « pushing » ne puise pas son dynamisme uniquement dans l'énergie, il faut le rappeler.

Je vais terminer en réaffirmant qu'évidemment, comme pour le pétrole, il existe des limites à la bioéconomie. Les limites sont l'espace, et la capacité que nous avons à tirer parti de la photosynthèse, dans les champs et dans les bois.

On a étudié cela très finement pour la France, afin d'évaluer la contribution possible de la bioéconomie à notre futur, vers le milieu de siècle, tout comme on l'a étudié de manière plus globale pour le monde entier, avec des données de la FAO, de l'Agence Internationale de l'Energie, et de diverses sources. Il est donc très compliqué de parvenir à agglomérer toutes les données, notamment forestières.

Nous estimons, avec quelques « initiés », qu'il nous faudra, en 2050, de 400 à 500 millions d'hectares équivalents agricoles et forestiers au niveau mondial dédiés à la production de « carbone vert » pour répondre au quart des besoins de la civilisation de l'après-pétrole, et au quart des défis et objectifs du Facteur 4.

400 à 500 millions d'hectares représentent plus du quart de la surface agricole cultivable dans le monde. Cela pourrait faire peur et faire craindre la famine. Mais 500 millions d'hectares, c'est aussi un sixième de la surface forestière du monde qui est très largement sous valorisée. Peut-on alors se permettre le luxe de « mettre en réserve » massivement des forêts (et des terres agricoles...) auxquelles on n'osera pas toucher quand on sait que l'on va manquer d'espace, de cellulose, de matériaux, d'énergie, de « carbone vert »... et peut-être d'aliments ? Faut-il aussi rappeler à ceux qui l'ignorent que le meilleur moyen de protéger les forêts, tropicales y compris, c'est précisément de les gérer, de les exploiter, et de les cultiver efficacement et durablement pour y intéresser les populations et conférer une utilité sociale et économique à ces espaces.

Grosso modo, cela veut dire que si l'on veut réussir ce pari du siècle, à 10 milliards d'habitants pour 2050, il faut que l'on fasse activement cultiver et produire nos forêts tout comme nos terres agricoles. Mais il faut aussi maîtriser simultanément nos consommations de viande et de lait parce qu'elles mobilisent à peu près six à sept fois plus d'espace par ration alimentaire

que des aliments à base végétale. Il faut bien entendu que l'on sauvegarde nos récoltes, parce que l'on perd aujourd'hui environ 30 % des stocks de céréales dans le monde, à la récolte, au transport et au stockage. Il faut enfin que l'on développe encore plus l'aquaculture, et notamment en mer, laquelle est très efficace comme source de production de protéines.

En même temps, bien sûr, nous devons, appliquer des modalités de production agricole et forestière assez intensives, mais qui soient aussi sobres et diversifiées. C'est là le vrai défi, pour ceux qui s'intéressent à la recherche agronomique.

Alors, au point où nous en sommes parvenus de ce puzzle bioéconomique, vous comprenez qu'il est essentiel de pouvoir expliquer et communiquer sur ces données complexes et systémiques, tant nos sociétés urbanisées sont finalement devenues « amnésiques et myopes ». Dans la ville, de nos jours, on veut tout consommer bien sûr, mais sans qu'il faille rien produire! Car cela gêne et dérange. Tout consommer mais ne rien produire, voilà le paradoxe de notre société désormais veuve de ses fondamentaux, et qui a oublié même la notion de rareté.

Il faut donc bien, pour nos enfants, parvenir à retrouver et à leur transmettre un peu de bon sens « paysan », mais on constate malheureusement que ni la parole institutionnelle, ni la parole professionnelle n'ont désormais véritablement d'audience. La polémique nous prive trop souvent d'information.

Le seul moyen de peser sur le savoir n'est-il pas alors de travailler à « armes égales » avec les prescripteurs d'opinion, en adoptant nous aussi les habits et les porte-voix d'associations, d'ONG, ou de fondations capables de donner ses bases scientifiques et populaires à la bioéconomie ?

## LE SUCCÈS DES BIOÉNERGIES ALIMENTÉES PAR LE SOLEIL AU BRÉSIL

**Caroline RAYOL**

*Chef de Projet Bioénergies et Ressources, Pôle de compétitivité Industries et Agro-Ressources  
Ex. conseillère Bioénergies du Premier Ministre brésilien.*

J'ai commencé ma carrière en France ce qui m'a donné l'opportunité d'avoir un regard externe du potentiel et du géantisme brésilien. Ensuite, j'ai travaillé en tant que conseillère du premier ministre brésilien pour la bioénergie, ce qui m'a permis de mieux appréhender les stratégies de ce pays. Aujourd'hui, je travaille au sein du pôle de compétitivité Industries & Agro-Ressources (IAR) qui a pour but de créer un environnement favorable à l'innovation autour de la valorisation de la biomasse, ce qui me permet d'avoir une vision d'ensemble de la bioéconomie.

J'ai choisi le titre ci-dessus, car le soleil est la source d'énergie de la bioénergie et sa principale vertu. De par sa propre nature, la bioénergie est en soi démocratique et permet une production décentralisée de l'énergie. Les radiations solaires et la surface représentent en effet au Brésil ses principaux avantages compétitifs. Au travers de la bioénergie, le soleil est donc véritablement au service de l'homme.

Avant d'entrer dans les détails voici quelques éléments contextuels. Le Brésil est un pays à forte disparité, avec plus de 50 % de la population sous le seuil de 250 euros par mois. Même si le Brésil est aujourd'hui la 7ème économie mondiale, il se place au 85ième rang mondial, parmi 187, sur le développement humain. Il y a donc une disparité conséquente entre le développement économique et social.

Le gouvernement brésilien considère la bioénergie comme une opportunité pour créer des emplois non délocalisables et de nouvelles sources de revenus. Il est en effet préférable, de consommer une énergie produite localement plutôt que le pétrole importé. De par sa nature d'extraction, les revenus générés par la filière pétrolière sont concentrés dans les mains d'un nombre réduit d'acteurs comparé à la filière bioénergie, qui génère de la croissance dans les secteurs agricoles et industriels.

L'éthanol de canne permet une réduction de GES de plus de 70 % en comparaison avec l'essence. De plus, toutes les usines de production d'éthanol au Brésil (plus de 400) sont autonomes en énergie car alimentées par la bagasse.

La diversification énergétique permet au gouvernement de réduire les risques et sa dépendance vis-à-vis d'une filière donnée. Le développement des bio-carburants entraîne en effet un impact positif sur la santé publique grâce à la réduction des rejets de gaz polluants, comme par exemple le dioxyde de soufre.

### Contexte historique

En 1973, la crise pétrolière a entraîné la hausse spectaculaire du prix du baril de brut ; en parallèle le marché du sucre a connu une baisse de son prix international. Face à cette crise du pétrole et la disponibilité de matière première, le gouvernement brésilien a saisi l'opportunité d'augmenter sa sécurité énergétique via le lancement du Programme National de l'Alcool (Proalcool). Dans ce cadre, l'Etat a mis en place un ensemble de mesures d'aides (fixation de prix rémunérateurs, crédits bonifiés pour les investissements, parité du prix entre le bioéthanol et le sucre etc.) et d'incitations fiscales (par exemple, pour l'achat de voitures fonctionnant à l'éthanol), afin d'insérer l'éthanol dans la matrice énergétique brésilienne. Ce programme a réussi à insérer 10 millions de véhicules 100 % éthanol dans les rues brésiliennes.

A partir du milieu de la décennie 1980, les conditions se sont inversées. L'évolution des prix du pétrole a chuté, tandis qu'au même moment le prix du sucre sur le marché international est remonté. En conséquence, les mesures de ce programme ont commencé à devenir très coûteuses pour l'Etat, qui a donc décidé de réduire le taux d'incorporation obligatoire d'éthanol à l'essence à 20 %. Cela a permis d'assurer une continuité au développement de ce marché et de positionner le Brésil en tant que leader mondial en matière de production d'éthanol (2ième position derrière les Etats-Unis). En 2003, les voitures Flex-fuel ont été mises à disposition sur le marché. Ces véhicules sont spécialement conçus pour fonctionner indifféremment à l'essence, à l'éthanol (100 %) ou au mélange des deux en même temps, sans aucun changement. Aujourd'hui, il existe 20 millions de voitures Flex-fuel dans les rues au Brésil, soit 50 % des véhicules individuels, c'est très intéressant.

En 2004, le programme national du biodiesel a été créé. L'objectif de ce programme était d'introduire le biodiesel dans la matrice énergétique brésilienne d'une manière durable, tout en respectant les domaines social, environnemental et économique. J'ai personnellement travaillé dans la coordination de la Commission interministérielle du programme du biodiesel, et je peux affirmer que ces trois piliers sont la base de cette politique publique. Les principes qui orientaient ce programme sont : la création d'emplois et de revenus (en particulier dans les zones rurales), la promotion de l'intégration sociale et la diminution des disparités régionales. En 2006, le biodiesel a ainsi été introduit dans la matrice énergétique brésilienne.



Aujourd'hui, quels sont les résultats ? Le taux d'incorporation d'éthanol dans l'essence se situe entre 20 et 25 % car cela dépend du volume de canne récolté qui varie en fonction des campagnes agricoles. Il s'agit d'une stratégie très perspicace. En 2003, lorsque les voitures Flex-fuel ont été mises sur le marché, le Brésil produisait 14 milliards de litres. En 2010, ce chiffre a doublé, donc la production est passée à 27 milliards, et pour la campagne 2012-2013, 23 milliards de litres ont été produits.

La figure ci-dessous montre qu'au Brésil, la part des énergies renouvelables représente 44 % dans la matrice énergétique, il s'agit d'une performance comparé aux pays de l'OCDE où la part des énergies renouvelables atteint 7 % en moyenne. La première source d'énergies renouvelables au Brésil est la canne, qui représente 15 % de l'énergie globale, y compris l'énergie utilisée dans les transports.

En 2013, le Brésil a produit 2,7 milliards de litres de biodiesel et le taux actuel d'incorporation est de 5 %.

La performance de la filière canne est significative. Pour produire 15 % de l'énergie du Brésil (pays de 190 millions d'habitants) seulement 0,5 % de la surface des sols est utilisé, contrairement aux idées reçues. Cette réussite est due à la constante augmentation de la productivité. En effet, en 1970 le rendement était de 4000 litres d'éthanol par hectare, alors qu'aujourd'hui ce chiffre représente le double et dans le futur il est espéré une production de 12 000 litres par hectare.

L'idée que la déforestation de l'Amazonie serait liée à la production d'éthanol représente un autre préjugé, trop souvent mis en avant par certains acteurs. Comme vous pourrez le constater dans le graphique ci-contre, cela est faux. On s'aperçoit en effet, que la déforestation n'a cessé de diminuer, alors que la superficie de production de canne a augmenté. Par ailleurs, il ne faut pas oublier que la canne permet, en plus de l'éthanol, de produire également de l'électricité et du sucre.

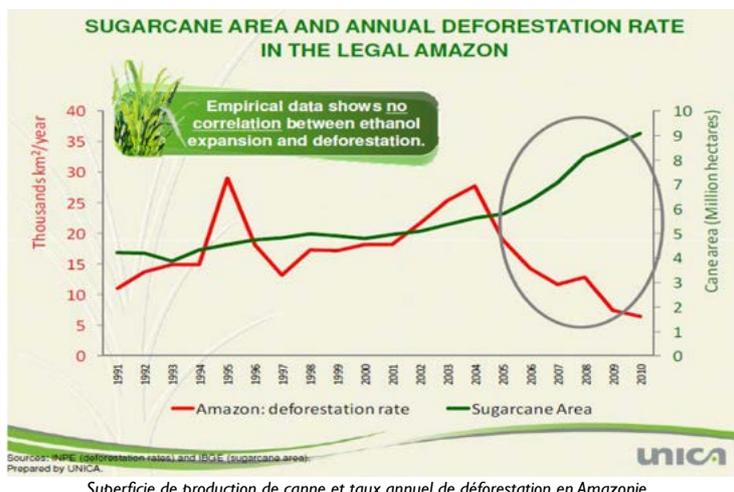
Il est également important de souligner que 20 % de toute la matière première utilisée pour produire du biodiesel est produite par l'agriculture familiale au Brésil. L'insertion de masse des agriculteurs familiaux dans la production d'énergie est une chose inédite et révolutionnaire. D'après ses projections et prévisions, l'EPE (Entreprise de recherche énergétique nationale) estime que 31,7 milliards d'euros seront investis dans la filière biocarburants à l'horizon 2021. La production d'éthanol devrait ainsi atteindre 60,2 milliards de litres et la production de biodiesel 4,1 milliards de litres. La canne ne représenterait plus 15 %, mais 20 % de l'énergie brésilienne, et la bagasse qui produit aujourd'hui 4100 mégawatts devrait produire 9000 mégawatts.

Pour conclure, je vous propose quelques éléments sur la sécurité alimentaire car beaucoup d'idées fausses sont aujourd'hui véhiculées. Il est donc important que le regard évolue. Il faut arrêter de voir les choses en noir et blanc, des analyses au cas par cas sont nécessaires. Chaque énergie utilise une matière première et ses impacts sociaux, économiques et environnementaux sont donc différents. Tout dépend d'où elle est produite et dans quelles conditions. Par exemple, beaucoup n'ont pas conscience qu'au Brésil, 74 % du biodiesel produit provient du soja. Or, seulement 20 % du volume du grain du soja est composé d'huile et les 80 % restants de protéines. Aucun agriculteur au Brésil ne cultive du soja pour la production de biodiesel, il ne s'agit que d'un coproduit. Avant le lancement du programme de biodiesel, l'huile n'avait presque aucune valeur. Aujourd'hui, l'huile de soja est devenue une source de revenu, ce qui a entraîné un impact positif sur le prix de la protéine.

Par ailleurs, mais les médias n'en font pas état, le suif qui est utilisé dans la production de biodiesel (à hauteur de 19 %), était un résidu très coûteux à traiter. Or, il s'agit aujourd'hui d'un biocarburant.

Ce résidu est donc devenu source d'énergie, avec pour conséquence un impact positif sur le coût de production de la viande. Par ailleurs, 2,3 % du biodiesel est issu de l'huile de la graine de coton. Le coton est cultivé pour le textile, mais on utilise également l'huile de la graine, pour produire le biodiesel. Ainsi, il faut

vraiment regarder au cas par cas, pays par pays, leurs forces et leurs faiblesses, afin que chacun d'entre eux utilise intelligemment ses atouts. Les deux ennemis de la sécurité alimentaire sont le changement climatique, puisque la production agricole est intimement liée au climat, et l'absence de sources de revenus.



Superficie de production de canne et taux annuel de déforestation en Amazonie

## LES AVANCÉES MAJEURES DANS LE DOMAINE DES BIOCARBURANTS

**Jean-Luc DUPLAN**

Responsable Biomasse, IFP Énergies nouvelles (IFPEN)

Je vais me concentrer sur les biocarburants, en particulier ceux de deuxième génération. Je commencerai par exposer la situation actuelle des carburants dans le monde afin de montrer comment les biocarburants peuvent s'y substituer. J'ai indiqué le niveau de consommation de carburant dans le monde. Le carburant le plus utilisé est l'essence. Son niveau est très élevé. C'est notamment le cas au Brésil. C'est pourquoi ce pays utilise de l'éthanol. Le second carburant le plus consommé au monde est le diesel, qui occupe tout de même la première place du classement en Europe.

94 % du secteur des transports routiers dépendent des carburants fossiles issus du pétrole, ce qui est énorme. Cela signifie que les carburants de substitution ne représentent que 5,7 % de la consommation. Il s'agit, dans l'ordre de consommation, des biocarburants, du gaz de pétrole liquéfié (GPL) et du gaz naturel pour véhicules (GNV). À l'échelle mondiale, le Brésil, qui était auparavant le premier producteur d'éthanol, occupe aujourd'hui la deuxième place derrière les États-Unis. L'Europe est quant à elle le premier producteur de biodiesel.

Je vais juste dire un mot à propos du bilan carbone. Il existe un moyen de produire du biodiesel et de l'éthanol : les biocarburants de première génération. La production de biocarburants a également explosé depuis 2000. Avant 2000, le Brésil était le seul producteur à l'échelle industrielle.

Depuis 2000, les États-Unis ont également rejoint ce marché et l'Europe qui produit du biodiesel.

Qu'est-ce que le bilan carbone ? Tout d'abord, il faut savoir que ce bilan peut être nul, car comme nous l'avons déjà expliqué, la biomasse nécessite de l'énergie solaire, de l'eau et du CO<sub>2</sub>. Le CO<sub>2</sub> est aussi le produit final. Lorsque vous utilisez des biocarburants dans votre véhicule, vous pouvez atteindre un bilan carbone nul. Ce n'est pas le cas, car vous avez besoin d'énergie pour produire, transporter et transformer la biomasse. Le bilan carbone peut être très largement supérieur à zéro. Dans certains cas, l'effet peut même être pire que si vous utilisiez du carburant fossile. C'est pourquoi il faut comparer les biocarburants et choisir ceux qui contribuent à réduire la production de gaz à effet de serre. On ne peut pas dire que tout est noir ou blanc; tout dépend du biocarburant.

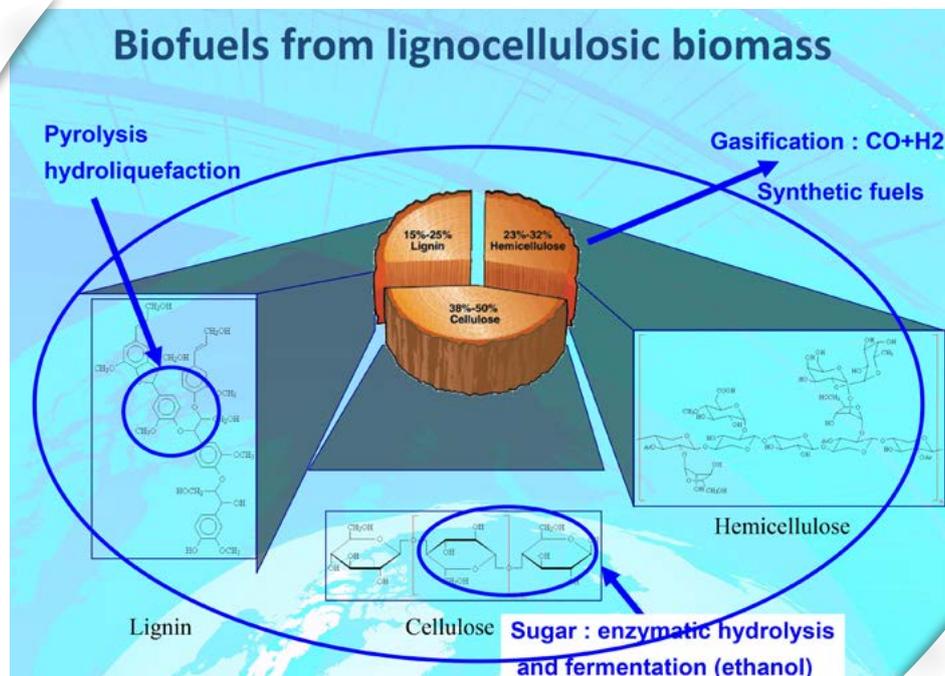
Si vous considérez de la biomasse telle qu'un morceau de bois ou de la paille, elle est constituée de trois composants principaux : la lignine, la cellulose et l'hémicellulose. Chaque composant peut produire des biocarburants de deuxième génération spécifiques. Le premier est la cellulose. La cellulose est un polymère de glucose, comme l'amidon présent dans le maïs aux États-Unis qui est utilisé pour produire de l'éthanol de première génération. La cellulose est transformée par hydrolyse à l'aide d'enzymes. Ce procédé permet d'obtenir du glucose, dont la biofermentation produit de l'éthanol.

La lignine est une structure chimique aromatique compatible avec une utilisation comme carburant. De nombreuses études en laboratoire ont démontré qu'il était possible de produire du carburant à partir de la lignine. La troisième technique est la gazéification et la synthèse du carburant.

La France mène actuellement deux projets d'envergure qui utilisent la biomasse lignocellulosique comme ressource. Leurs objectifs respectifs sont la production d'éthanol de deuxième génération et de carburants synthétiques. L'éthanol est actuellement produit selon un processus similaire à celui utilisé pour produire de la bière. Aujourd'hui, la lignocellulose ne sert pas à la production d'alcool destiné à l'alimentation. D'ici 2020 en revanche, on produira à partir du bois et de la paille un nouvel éthanol qui servira de carburant.

J'ai clairement mentionné les biocarburants de deuxième génération, qui utilisent un processus synthétique.

Vous ne le savez peut-être pas, mais les carburants synthétiques existent déjà. Il y a de nombreuses années, l'apartheid était en vigueur en Afrique du Sud, ce qui empêchait le gouvernement et les industriels d'importer du pétrole à utiliser comme carburant. Le pays a donc utilisé le charbon local pour produire du carburant synthétique. C'est de là que proviennent les technologies actuelles de transformation du charbon en liquide, qui contribuent à la production de gaz à effet de serre. Leurs émissions de CO<sub>2</sub> sont largement supérieures à celles du pétrole. Le Qatar et la Malaisie utilisent également du gaz naturel pour produire des carburants synthétiques. Les carburants issus de la biomasse sont chimiquement identiques à ceux qui sont issus du charbon ou du gaz naturel, mais leur bilan carbone est bien meilleur.



## II. Les énergies marines

### LE DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES MARINES RENOUVELABLES EN FRANCE

**Marc BOEUF**

*Directeur R&D, France Energies Marines*

Dans un premier temps, je ferai un tour d'horizon des technologies impliquées dans les énergies marines renouvelables. Je poursuivrai avec la présentation de différents projets français. J'évoquerai ensuite le niveau de maturité des technologies et je conclurai par une rapide présentation de l'approche de l'Institut France Energies Marines.

Je dois rappeler que la principale énergie marine est d'origine astronomique. La source principale est le soleil, et la lune agit sur les marées, c'est pourquoi nous parlons d'énergie renouvelable. Il ne faut pas oublier que le développement de l'énergie marine renouvelable présente divers aspects.

Il ne s'agit pas d'une technologie principale unique, mais de nouveaux systèmes très différents qui s'adaptent à la grande variabilité de l'environnement marin.

J'aimerais attirer votre attention sur le premier point, qui concerne l'éolien offshore. Nous savons que des fermes éoliennes fixes ont déjà été installées il y a plusieurs années, notamment dans le nord de l'Europe. Elles sont complémentaires de l'éolien offshore et l'énergie éolienne fixe d'aujourd'hui se transformera demain en plateformes flottantes dans les eaux profondes.

Les énergies dites marines sont basées sur les vagues, les marées, les courants, les gradients de température et l'énergie osmotique. Partout en Europe, la recherche porte sur l'ensemble de ces éléments.

Comme je l'ai indiqué tout à l'heure, l'énergie éolienne offshore fixe a déjà atteint un stade de développement industriel en Europe. Presque 6 GW sont déjà installés dans le nord de la mer Baltique, pour le Danemark, l'Allemagne, la Belgique, mais aussi le Royaume-Uni.

En France, le premier appel d'offres a été lancé en 2011 pour 5 sites, suivi en 2013 d'un deuxième appel d'offres pour 2 sites dans le Golfe de Gascogne. L'objectif est d'installer plus de 3 GW en France d'ici 2020. À l'origine, il était question de 6 GW. Plusieurs sociétés françaises ont été retenues lors du premier appel d'offres. Une éolienne Areva d'une puissance de 5 MW sera installée à Saint-Brieuc, en Bretagne, avec le concours d'Iberdrola. Ce type d'éolienne a déjà été installé en Allemagne et bientôt au Royaume-Uni. Autre exemple, une nouvelle éolienne nommée Haliade 150, développée par Alstom, sera installée dans le cadre du premier appel d'offres. EDF supervise les travaux. Le deuxième appel d'offres porte sur deux zones à proximité de la Vendée.

Par la suite, des éoliennes flottantes seront proposées pour compléter les installations et faciliter la maintenance. Le système flottant est relativement adaptable, en particulier pour les côtes françaises, où la profondeur est généralement de 50 m. Il existe deux projets majeurs de systèmes flottants en France. La Winflo a été développée par Nass&Wind et DCNS en Bretagne. Il s'agit d'une plateforme semi-submersible sur laquelle repose une éolienne à axe horizontal de 5-7 MW. L'objectif est d'installer plusieurs machines à taille réelle sur le site pilote, situé au sud de l'île de Groix, entre 2015 et 2018. Ce site se trouve à proximité d'un site test de France Energies Marines.

Il y a également la technologie Vertiwind développée par Nénuphar et EDF. Cette plateforme très innovante intègre une éolienne à axe vertical. Le projet consiste à installer plusieurs machines en Méditerranée, à proximité de Fos-sur-Mer, d'ici 2016. Par ailleurs, la start-up marseillaise Ideol qui a conçu un système de fondations flottantes pour l'éolien offshore, développe un démonstrateur en mer de 2 MW.

En ce qui concerne les systèmes flottants, j'aimerais attirer votre attention sur les projets japonais. Suite à l'accident de Fukushima, deux machines ont été installées cet été au Japon. Deux autres systèmes sont déjà en place, notamment la technologie HighWind de Statoil, au large de la côte ouest de la Norvège. Une machine d'une capacité de 1 MW est également installée au Portugal. Il s'agit du système flottant windWindF développé par PrinciplePower.

L'usine marémotrice de la Rance en Bretagne, est un site historique pour l'énergie marine renouvelable. Elle offre un solide potentiel d'énergie marémotrice, mais il faut tenir compte de l'impact environnemental. Cette installation a toutefois une immense capacité de production d'énergie. Un nouveau projet est en cours en Corée du Sud et des études sont menées au Royaume-Uni.

Il existe à proximité de la côte une méthode prévisible et extrêmement utile de production d'énergie qui permet de profiter de l'énergie cinétique des courants de marée. Cette méthode est très intéressante, mais les technologies disponibles nécessitent un fort courant et les sites adaptés sont peu nombreux. Les meilleures zones en Europe se situent autour du Royaume-Uni et dans la Manche. Le prototype Openhydro développé par DCNS a été installé dans diverses régions du globe : la baie de Fundy au Canada, les Orcades en Écosse et plus récemment en France, à proximité de Paimpol en Bretagne Nord. Un autre système, développé par la PME Sabella a été testé en Bretagne Sud. Pour finir, Alstom proposera la technologie TGL (Tidal Generation Limited) pour le développement de sites pilotes en France.

Le Président François Hollande a lancé tout récemment un appel à projets pour l'installation de fermes pilotes sur deux sites, dans le raz Blanchard et au Fromveur, appropriés en termes de localisation et de courant.

On peut dire que les vagues ou la houle offrent un immense potentiel, probablement le meilleur après l'éolien offshore. Il n'en demeure pas moins que nous devons attendre des technologies fiables qui ne sont pas encore disponibles. De nombreux systèmes sont mis à l'essai sur de nombreux sites tests, mais aucun n'est encore prêt pour un déploiement industriel. Par exemple, le système français Bilboquet, développé par la PME D2M en Méditerranée. Il y a également le projet Searev de l'École Centrale de Nantes, sur la côte atlantique. Sur l'île de la Réunion, dans l'océan Indien, EDF installe cette année un démonstrateur CETO, basé sur un concept australien. La compagnie d'électricité finlandaise Fortum et DCNS ont récemment annoncé un nouveau projet dans la baie d'Audierne en Bretagne, avec le WaveRoller. AWS a été développé par Alstom en Écosse.

La technologie de conversion de l'énergie thermique marine utilise le différentiel de température entre les eaux profondes froides et les eaux de surface plus chaudes.

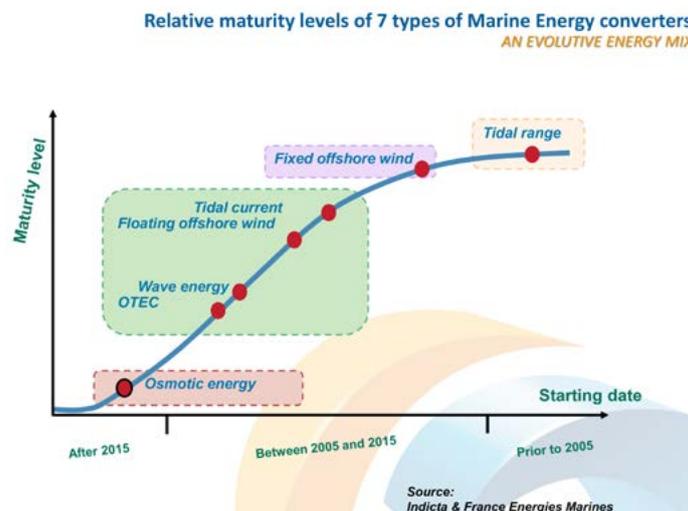
Cette source d'électricité de base présente l'intérêt d'être abondante, mais des développements technologiques sont toujours en cours pour réduire les coûts. La société française DCNS conçoit une plateforme flottante qui intègre un échangeur thermique et une longue conduite pour pomper l'eau froide à 1000 m de profondeur. Un prototype sera développé à la Réunion ou en Martinique. C'est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus intéressantes pour les îles isolées de la région de l'équateur.

Une étude prospective est en cours pour comparer le niveau de maturité des différentes technologies. L'exploitation des coefficients de marée par les usines marémotrices a commencé il y a 40 ans à l'échelle industrielle avec le barrage de la Rance.

L'énergie éolienne offshore fixe a atteint son point culminant. Des expérimentations ont déjà été menées avec des éoliennes utilisant les courants des marées ou des plateformes flottantes offshore. Mais il faudra encore attendre plusieurs années pour que ces technologies puissent être déployées dans une véritable centrale électrique. Dans la ceinture tropicale, les convertisseurs d'énergie thermique industriels seront alors déployés dans des conditions réelles et la mise en œuvre industrielle pourra commencer lorsque la technologie sera rentable.

J'approche de la fin de ma présentation. Je tiens d'abord à vous rappeler le principal engagement de l'Europe pour le développement des énergies renouvelables : vous connaissez les objectifs « 20-20-20 », et en France, il y a notamment les objectifs du Grenelle de l'environnement et du Grenelle de la Mer. J'ai cité la capacité installée en Europe pour différentes technologies, y compris l'éolien offshore, et les perspectives pour la France aux horizons 2030 et 2050. L'éolien offshore est le secteur qui offre le plus gros potentiel, notamment les plateformes flottantes. Si nous parvenons à réduire les coûts de la technologie, il représentera une source d'énergie abondante pour les zones tropicales. Enfin, l'énergie marine renouvelable sera devenue en 2050 l'une des principales technologies pour la production d'électricité renouvelable en France. Cela inclut l'éolien offshore, mais pas toutes les technologies.

Je vais terminer par une présentation rapide de l'institut France Energies Marines. Il s'agit d'un institut français de recherche et de développement dédié aux énergies marines renouvelables. Nous comptons 37 membres, parmi lesquels figurent de grandes entreprises, des PME, des centres de recherche publics, des universités et des conseils régionaux. L'objectif prioritaire de France Energies Marines est d'améliorer la recherche et le développement et de proposer aux industriels des sites tests pour l'installation de démonstrateurs.



### III. La géothermie

#### ÉNERGIES GÉOTHERMIQUES EN EUROPE

**Burkard SANNER**

Président « European Geothermal Energy Council » (EGEC)

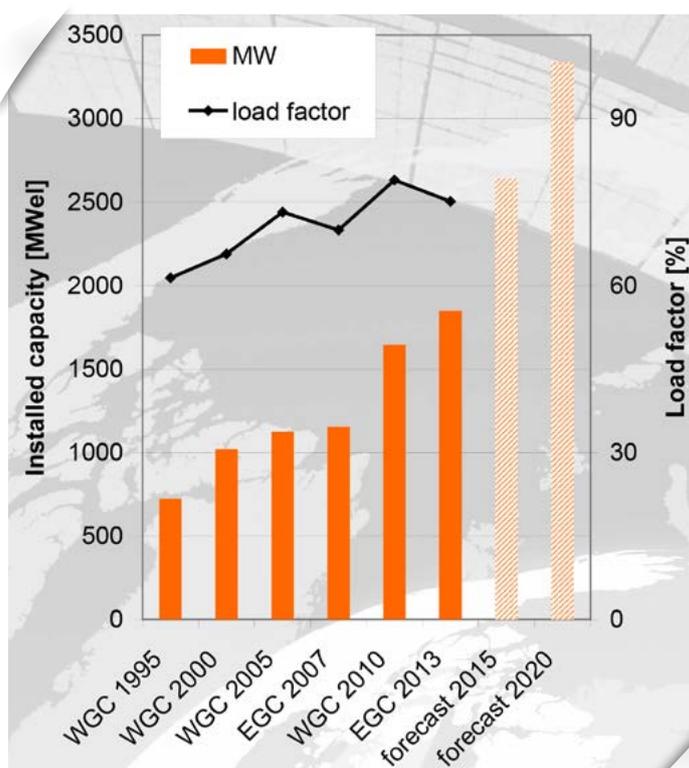
Je tiens à revenir sur l'année 1973, qui a vu l'organisation du premier congrès et qui a déjà été mentionnée à plusieurs reprises. C'était il y a précisément 40 ans, alors que j'entrais moi-même à l'université. En 40 ans, beaucoup de choses se sont

passées. Le Conseil européen des énergies géothermiques (European Geothermal Energy Council) ne se trouve pas en Allemagne (mon pays d'origine), mais à Bruxelles, en Belgique, où sont prises les décisions concernant l'Europe.

Pour commencer, je pense qu'une présentation rapide de l'énergie géothermique s'impose. Il y a une grande différence entre l'énergie géothermique et l'énergie marine mentionnée précédemment. L'énergie marémotrice est régie par la lune et le reste provient du soleil, bien que les vagues soient principalement formées par les courants. L'énergie géothermique est une énergie terrestre qui provient de l'intérieur de la Terre. Il s'agit en effet d'« une énergie emmagasinée sous forme de chaleur sous la surface de la terre solide ». Elle est définie pour la première fois dans la législation de la Commission européenne par le biais de la Directive 2009/28, la fameuse directive 20-20-20.

Je citerai comme exemple la centrale géothermique de Valle Secolo, qui est la plus puissante d'Europe. Située en Toscane, elle a une puissance de 120 MW, via deux blocs de 60 MW. Mais il y a également le secteur de la production de chaleur et de froid. Il ne faut pas oublier que la production de chaleur représente environ 50 % de la consommation d'énergie finale en Europe. La décarbonisation du processus de production de chaleur tient une place très importante dans le secteur énergétique global.

Nous utilisons l'énergie géothermique issue de ressources profondes, principalement pour les réseaux de chaleur, car elle est abondante.



Développement de la production d'énergie géothermique en Europe

J'ai déjà eu l'occasion de discuter avec des personnes du secteur solaire. Je sais qu'elles n'apprécient pas toutes la géothermie, car la Terre a des capacités limitées et le soleil a une espérance de vie bien supérieure. Elles ont raison. En tant que planète viable, la Terre a une espérance de vie de 1,5 milliard d'années. La Terre elle-même peut encore durer 4 milliards d'années et le soleil 10 à 12 milliards. Je ne serai plus là pour le voir et je suppose d'ailleurs qu'il n'y aura plus personne, donc nous ne savons pas ce qui se passera. À notre échelle de temps, celle de l'humanité, nous percevons la chaleur qui se trouve à l'intérieur de la Terre comme une énergie durable.

Il existe deux types d'utilisation de cette énergie, qui sont communs à celles de la biomasse. C'est une énergie polyvalente. Il y a la production d'énergie, qui représente une part importante de l'énergie géothermique. Dans ce domaine, la géothermie possède des avantages, comme je vais le démontrer.

Dans ce secteur, on parle en mégawatts. Nous utilisons la chaleur de ressources en surface, généralement à l'aide de pompes à chaleur. Le chauffage géothermique via une pompe est une activité très développée en France. Nous utilisons également la chaleur dans l'agriculture et l'industrie et une première féculerie utilisant un processus industriel chauffé par sources géothermiques verra le jour en France. Nous en entendrons peut-être parler à l'avenir, je ne sais pas quand.

Cela nous a conduits à réfléchir à la biomasse. Les biocarburants nécessitent une conversion et de la chaleur. Il existe peut-être des synergies entre la géothermie et les bioénergies pour permettre cette conversion. Enfin, il y a les spas et la bioénergie qui représentent l'utilisation ancestrale de l'énergie géothermique. Cette utilisation était très répandue à l'époque romaine et au Japon, avec les spas Onsen.

Chevilly-Larue, au sud de Paris, dispose de l'un des plus grands réseaux de chaleur basés sur l'énergie géothermique. Il existe près de 40 centrales en Île-de-France et celle-ci compte parmi les plus importantes. La ville hongroise de Szentes possède un grand complexe de serres, probablement l'un des plus importants après ceux des Pays-Bas, entièrement chauffé par géothermie. Il existe de nombreuses autres installations de ce type en Hongrie.

Nous n'allons pas passer en revue toutes les prévisions, mais nous allons nous intéresser à certaines d'entre elles. Cette idée est tirée de la feuille de route géothermique 2011 de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Je tiens à remercier l'AIE pour cette activité. J'ai moi-même fait partie du groupe d'experts et cette feuille de route s'est révélée très utile. En 2050, nous atteindrons environ 1400 TWh pour une capacité installée de 200 GW. Cela montre que l'énergie thermique produit une grande quantité d'électricité. Les projections pour les plateformes technologiques d'électricité géothermique en Europe sont même un peu supérieures. Des valeurs de 320 GW à l'échelle mondiale et 90 à 100 GW pour l'Europe sont envisagées pour 2050, à condition que la R&D suive.

L'énergie géothermique présente l'avantage de ne pas être variable. Sa production peut être contrôlée. Nous disposons de chiffres issus des congrès de géothermie organisés ces dernières décennies : le congrès mondial de la géothermie à l'échelle mondiale et le congrès européen sur la géothermie en Europe. Nous disposons toujours des rapports actualisés de chaque pays, que nous synthétisons. Ces chiffres sont plus complets que ceux d'Eurostat, car ils concernent l'ensemble de l'Europe.

J'ai indiqué la croissance et les prévisions pour la période 2015-2020. Environ 3 200 MW seront installés d'ici 2020. Le chiffre pour 2015 est assez fiable du fait des longs délais de mise en service des centrales géothermiques. Toutes ces centrales sont en cours de construction pour 2015. Le facteur de charge a augmenté, pour s'établir entre 70 % et 80 %. Ce n'est pas beaucoup mieux que le nucléaire, mais c'est mieux. Le problème en ce qui nous concerne est que la forte part d'énergies renouvelables variables peut encore faire baisser ce facteur. Nous pourrions produire de l'énergie, mais nous pourrions aussi ajuster l'offre à la demande pour satisfaire nos collègues du secteur des énergies renouvelables variables.

J'aimerais également attirer votre attention sur un projet qui arrivera à son terme cette année. Il s'agit du projet GEOELEC, financé par la Commission européenne dans le cadre du programme Intelligent Energy Europe (IEE). Une version test de la carte du potentiel de l'énergie géothermique est à présent disponible. Cette carte nous donne une idée de la direction à suivre et de ce que la géothermie peut apporter à l'Europe jusqu'en 2050.

Il reste quelques étapes à franchir avant la mise au point d'une plateforme technologique d'électricité géothermique, mais d'ici 2020, nous aurons établi une base pour que la géothermie atteigne un véritable stade industriel. Ce secteur existe déjà, simplement il n'est pas encore structuré. D'ici 2030, cette source d'énergie sera plus abordable et plus compétitive. Je dois souligner que l'électricité géothermique est déjà très compétitive dans certains pays, tels que l'Islande, l'Italie et la Turquie. La semaine dernière, le Premier ministre turc Erdogan a inauguré la dernière centrale, d'une capacité installée de 75 MW, à Denizli. La Turquie attache une grande importance à cette source d'énergie pour la production d'électricité de demain. Au-delà de 2030, nous nous efforcerons de fournir à l'Europe une grande partie de l'énergie dont elle aura besoin.

Je vais dire quelques mots sur le chauffage. J'ai inclus des chiffres de la plateforme RHC (chauffage et refroidissement renouvelables), une autre plateforme technologique européenne, qui a publié son programme stratégique de recherche et d'innovation ce printemps à la conférence de Dublin. Je vous invite à lire ce programme si vous souhaitez comprendre un peu mieux le secteur du chauffage et du refroidissement.

Je parlerai uniquement des chiffres qui se rapportent à la géothermie. Il s'agit principalement des sources profondes, qui couvrent notamment des réseaux de chaleur industriels et des sources de surface. Nous attendons certaines avancées. Des centrales thermiques sont installées dans toute l'Europe, par exemple, à Reykjavik, Chevilly-Larue et Oradea (Roumanie).

J'approche de la fin de ma présentation et j'aimerais une nouvelle fois passer en revue certaines prévisions. D'ailleurs, il est toujours intéressant de revoir les anciennes prévisions de l'AIE concernant le prix des combustibles. Cela s'apparente aux jeux de hasard.

L'EGEC a été fondé en 1998 et a mené sa première action publique en 1999, il y a maintenant 15 ans. Cette activité s'est déroulée à Ferrara, à l'occasion du séminaire Ferrara Business. Elle avait donné naissance à la déclaration de Ferrara, une vision du déploiement de l'énergie géothermique en Europe. J'ai eu le plaisir et l'honneur à cette époque d'élaborer ce document.

J'ai dû me battre pour y faire figurer ces chiffres, qui m'ont valu de nombreuses critiques de la part d'un grand nombre de scientifiques. J'ai inclus les chiffres des secteurs du chauffage et de l'électricité. Il s'agissait de nos attentes pour l'année 1999 d'après les chiffres de 1998. Nous disposons des chiffres réels de 2012, à partir desquels nous avons établi notre comparaison. Le chauffage géothermique est donc en bonne voie. Nous avons en revanche un léger retard dans l'électricité, que nous aurons comblé d'ici 2020. Par prudence, je ne ferai pas de prévisions pour 2030 ou 2050, mais sur les 20 dernières années (15 dans ce cas), les chiffres sont assez parlants.

## PRÉSENTATION DU SECTEUR GÉOTHERMIQUE EN FRANCE, CAS DE LA RÉGION ALSACE

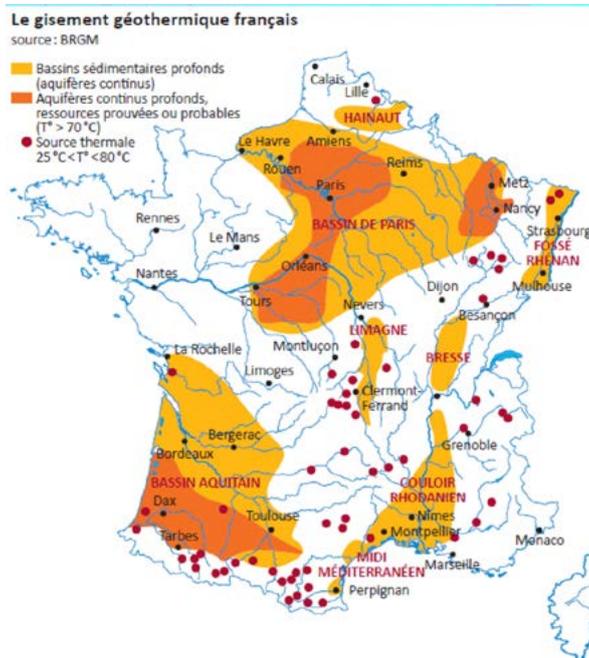
**Jean-Jacques GRAFF**

Président de Électricité de Strasbourg Géothermie (ESG)

Je vais parler de la situation actuelle du secteur géothermique français, et plus particulièrement en Alsace. Je ne vais pas m'intéresser uniquement à la géothermie de surface, mais aussi à la géothermie profonde. Il existe trois types de géothermie profonde. Le premier et le plus courant, est basé sur des aquifères horizontaux, comme le Bassin parisien et le Bassin aquitain. La France dispose aujourd'hui de 65 installations de ce type. Cette technologie produit beaucoup d'énergie et chauffe plus de 500 000 personnes.

L'objectif pour les îles volcaniques est de parvenir à l'autonomie énergétique en quelques années. La France dispose d'outils pour développer cette énergie géothermique.

Elle dispose même de nombreux outils, pour la plupart créés par l'ADEME. Le plus récent est le Fonds chaleur renouvelable destiné notamment à favoriser le développement de la production de chaleur géothermique. Ce fonds inclut également une garantie de forage pour déterminer les températures et les débits des réservoirs.



Le deuxième est l'électricité, c'est-à-dire la géothermie profonde haute entropie, haute énergie et haute température. Ce type couvre deux domaines, dont les systèmes volcaniques classiques avec production d'électricité. Une centrale de 15 MW est en service en Guadeloupe. L'autre domaine est l'EGS (Enhanced Geothermal Systems). Il s'agit d'un système non volcanique constitué de roches naturelles fracturées dans lesquelles l'eau circule. Cette technologie est très difficile à maîtriser. Il existe un site pilote à Soultz-Sous-Forêts, en Alsace. Ce site très ancien a fait l'objet de plus de 20 ans de recherche. La production est très réduite (1,5 MW), mais il s'agit d'un pilote scientifique.

Les objectifs de la France ont été définis lors du Grenelle. Nous devons atteindre 80 MW d'électricité en 7 ans, ce qui est un peu court. Nous visons également une production annuelle de 500 kilotonnes d'équivalent pétrole de chaleur en 2020.

Nous bénéficions depuis 2010 d'un nouveau tarif d'achat fixé à 0,20 €/kWh. L'ADEME a également lancé récemment un appel à manifestations d'intérêt pour le développement de nouveaux démonstrateurs et pour la recherche et la fabrication de nouvelles centrales géothermiques.

Nous disposons actuellement de 11 licences d'exploration en France, dont 8 en Alsace. 9 nouvelles licences sont à l'étude. Dans le domaine de la production d'électricité, nous avons un projet de grande envergure en République dominicaine, l'île qui se trouve entre la Martinique et la Guadeloupe. C'est un projet ambitieux de 120 MW. Plusieurs projets EGS sont en cours. Concernant l'utilisation directe de l'énergie géothermique pour le chauffage, de nombreuses centrales existantes sont en cours de réhabilitation et de nouvelles sont mises en service dans la région parisienne.

Nous travaillons également à la restructuration du secteur français. La France dispose de solides compétences dans la chaîne globale de projets géothermiques : le développement de projets, l'exploration, le forage, la construction et la maintenance de centrales. Mais toutes ces activités ne sont pas correctement articulées. Nous devons développer la structure du secteur de l'énergie géothermique renouvelable.

Il existe deux structures principales : la Renewable Energy Federation, qui s'intéresse au développement de l'énergie géothermique et l'Association française des professionnels de la géothermie (AFPG), créée il y a 3 ans. Nous devons promouvoir l'énergie géothermique profonde. En avril prochain, nous organisons la première conférence consacrée aux activités R&D, scientifiques et industrielles de l'énergie géothermique en France. Comme je l'ai indiqué, l'ADEME a travaillé à la structuration du secteur pour les entreprises avec pour objectif l'exportation de cette connaissance.

Je vais me concentrer sur l'Alsace. Nous avons aujourd'hui le projet Soultz, qui est le plus ancien au monde. Ce projet est très connu du secteur géothermique. Comme je l'ai déjà dit, sa production n'est pas très élevée, mais il compte 4 puits, dont 3 de 5 km de profondeur et 1 de 3,5 km. Ce site contribue largement à l'approfondissement des connaissances dans le secteur. Il représente 25 années de recherche et 80 millions d'euros d'investissement, répartis à parts égales entre l'ADEME (un grand merci à eux), l'East Central Energy (ECE), le ministère français de l'Environnement et les sociétés participant au projet. Nous avons davantage concentré nos recherches sur la subsurface et le sous-sol plutôt que sur la surface. Aujourd'hui, nous rencontrons de nombreux problèmes au niveau de la surface, du fait notamment de la précipitation de sels minéraux et de la corrosion.

Le premier projet industriel mené en France après Soultz est le projet ECOGI, comme l'a indiqué M. Sanner. L'objectif de ce projet est d'alimenter en chaleur l'usine de transformation d'amidon. La société ECOGI a été créée par le groupe ÉS (une société alsacienne de distribution d'électricité), Roquette et la Caisse des Dépôts (une institution publique). Le premier puits a été creusé avec succès. Les connaissances acquises grâce au site de Soultz-Sous-Forêts ont ouvert la voie à de nombreux développements. Par exemple, après le forage, le débit était 50 % inférieur à celui d'aujourd'hui et les stimulations ont considérablement amélioré la connexion entre le puits et le réservoir. Aujourd'hui, la température est de 170 °C et un débit de 70 litres par seconde a pu être atteint. La centrale n'est pas destinée à produire de l'électricité, mais de la chaleur. Elle produit d'ailleurs 24 MW de chaleur.

Nous avons également créé en Alsace un laboratoire d'excellence dédié à la géothermie profonde, qui est géré par l'Université de Strasbourg et le CNRS. Nous avons instauré un partenariat très étroit avec ces deux entités pour développer et améliorer les outils

d'exploration et d'exploitation. L'objectif est de disposer d'un organe d'observation et d'enseignement, mais aussi d'un organe de R&D qui mène des recherches. Le laboratoire créera et développera des outils comme les compagnies pétrolières l'ont fait autrefois.

Nous avons obtenu 8 licences en Alsace, avec 5 acteurs, ce qui stimule la recherche. Le champ d'application est large et très intéressant. Nous avons des températures comprises entre 30 et 200 °C, ce qui correspond aux 200 °C de Soultz-Sous-Forêts. Il y a de nombreux acteurs, à l'instar de l'Université de Strasbourg et du CNRS. Les écoles d'ingénieurs sont également très impliquées. La France et l'Allemagne ont établi un partenariat solide, avec le KIT (Karlsruher Institut für Technologie). L'Alsace est une région particulièrement intéressante. Le secteur industriel y est très développé et permet de produire de la chaleur et de la vapeur pour les entreprises. La densité de population est idéale pour l'installation d'un nouveau réseau de chauffage. Il y a de nombreux réseaux de chauffage à Strasbourg.

Nous pensons que le premier type d'énergie géothermique, qui implique des réservoirs aquifères et sédimentaires, se développera à raison de 5 à 10 nouvelles centrales par an, lentement, mais sûrement. Nous envisageons également le développement de nouvelles applications pour la valorisation. Aujourd'hui, les centrales servent pour l'essentiel à chauffer les habitations. Il pourrait être intéressant de réfléchir à d'autres applications, notamment à des applications qui utilisent de la chaleur issue de la biomasse. Il faut aussi penser à l'exportation de notre savoir-faire. En France, nous sommes très doués pour effectuer des découvertes scientifiques, beaucoup moins pour les exporter.

En ce qui concerne les réservoirs volcaniques, très peu d'îles s'intéressent à cette technologie. L'objectif est de porter la part de l'énergie géothermique à 50 % dans les territoires d'outre-mer français sur 15 ans. Mais nous pouvons conjuguer les efforts de plusieurs sociétés françaises pour structurer et exporter notre expertise. Notre objectif est d'atteindre 100 MW d'électricité par an dans ce secteur en quelques années.

Le dernier type d'énergie géothermique profonde est l'EGS. Cette technologie n'est pas encore totalement arrivée à maturité, mais elle bénéficie de nombreux progrès. Avec les différentes licences dont nous disposons, nous espérons mener 20 projets en Alsace. Cette région fera office de moteur pour le pays, qui accueillera 20 autres projets sur 15 ans. Nous devons également combiner l'électricité et le chauffage et utiliser la chaleur résiduelle. Notre rendement est de 15 %. Nous avons accès à une vaste source de chaleur, mais la part de la chaleur haute température n'est pas si élevée. Il peut être intéressant de dénicher des applications pour cela. Je conclurai en disant que nous devons exporter l'expertise française et que l'objectif de 500 MW ne concerne pas uniquement l'électricité, mais aussi l'énergie thermique. Il s'agit de l'objectif annuel de l'EGS.

## IV. Quelles perspectives à moyen et long termes

### PROSPECTIVES POUR 2030/2050, AU-DELÀ DES DÉPLOIEMENTS TECHNOLOGIQUES

**Anne VARET**

Directrice Recherche et Prospective de l'ADEME

Cette présentation revient sur des visions prospectives. Beaucoup de présentations ce matin ont porté sur des aspects techniques et technologiques. Dernièrement, en France, a eu lieu un débat sur la transition énergétique. Le conseil national du débat a examiné différents scénarios prospectifs pour le futur énergétique de la France. L'idée est de vous présenter comment les énergies renouvelables peuvent potentiellement se développer et quelles sont les visions prospectives énergétiques que l'on peut avoir pour la France.

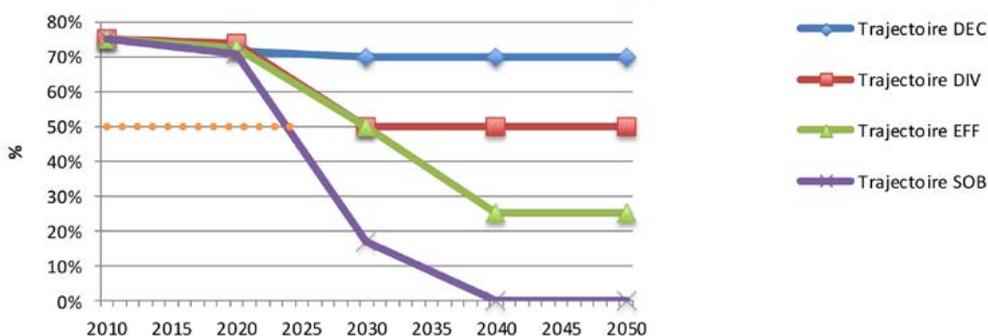
Dans ce débat national, différents scénarios ont été présentés, scénarios construits par des entreprises, des associations et des institutions. Il fallait qu'ils répondent, évidemment, aux objectifs des directives européennes à l'horizon 2020 et à l'atteinte du Facteur 4 en 2050. Il y avait aussi un objectif de réduire

demande en énergie et sur une forte pénétration des énergies renouvelables en substitution des combustibles fossiles ;

- des scénarios sobres, catégorie « SOB », avec une forte diminution de la demande en énergie et une forte pénétration des énergies renouvelables.

Les trajectoires « sobres » de ces scénarios, se traduisent par une forte pénétration des énergies renouvelables et une disparition totale du nucléaire dans la production d'électricité à l'horizon 2050. Les trajectoires qui portent sur une forte réduction de la demande en énergie conduisent aussi à une pénétration des renouvelables dans la production d'électricité relativement importante. Ces énergies renouvelables prennent aussi une part importante dans la production de chaleur, avec pénétration du biogaz.

% nuclear in electricity production



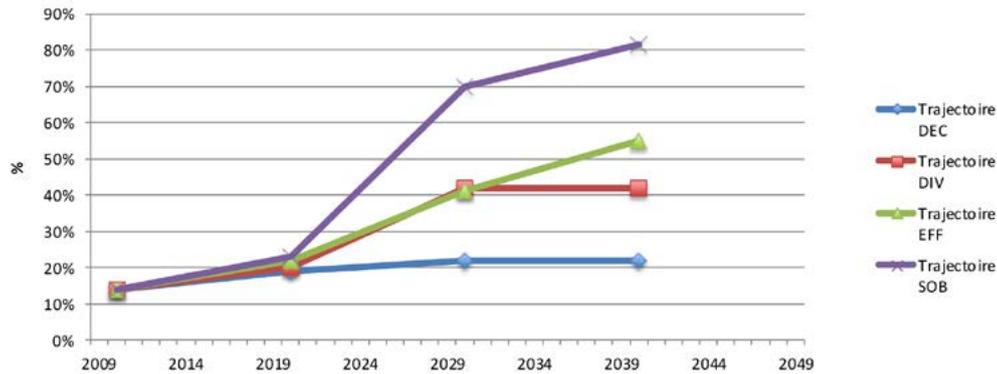
la part du nucléaire dans la production d'électricité.

Les différents scénarios qui ont été examinés peuvent être regroupés en quatre catégories :

- une catégorie appelée « DEC », pour décarbonation, conduisant à substituer les combustibles fossiles par de l'électricité ;
- une catégorie appelée « DIV » pour diversification, qui diversifie les sources d'énergie notamment avec l'intégration des énergies renouvelables, une partie est utilisée pour la production de chaleur et l'autre pour la production d'électricité ;
- des scénarios regroupés sous la thématique « EFF » pour efficacité énergétique, qui sont des scénarios basés sur une forte réduction de la

La trajectoire dite « DIV » reste modérée en termes de pénétration des énergies renouvelables et stabilise le nucléaire à 50 % à partir de 2030 et jusqu'en 2050. Enfin, les trajectoires « décarbonation » représentent surtout la substitution des fossiles par de l'électricité, mais l'on reste sur de l'électricité d'origine nucléaire.

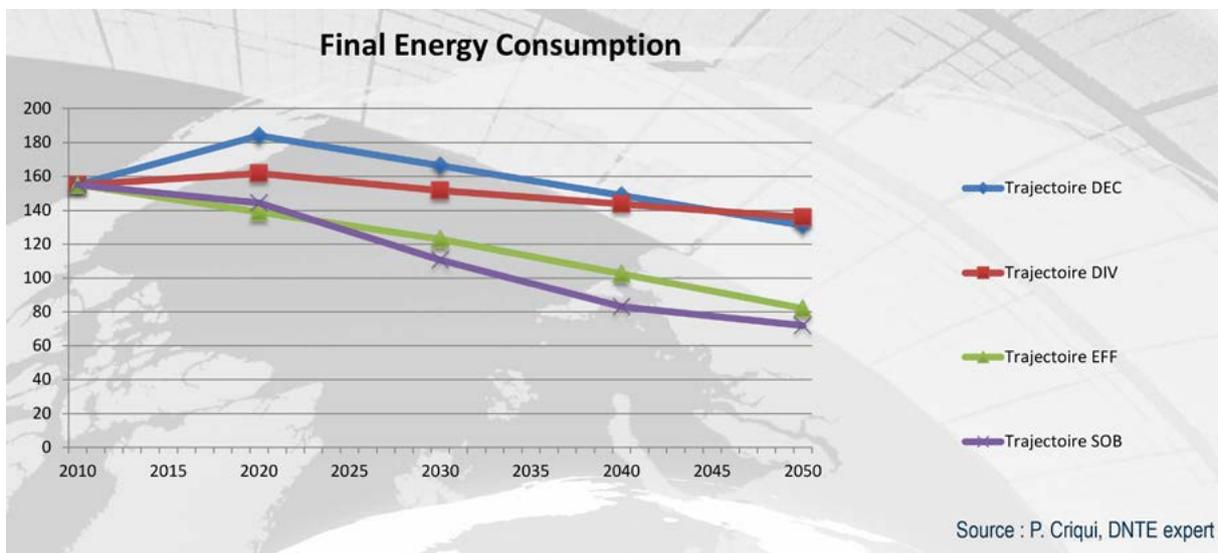
Il faut retenir de ces scénarios qu'ils avaient tous le souhait d'atteindre le Facteur 4. Dans la réalité, on se rend compte que tous ne permettent pas de l'atteindre, en tout cas pas sur ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre. Certains atteignent le Facteur 4 en termes de réduction d'émission de CO<sub>2</sub> mais pas de gaz à effet de serre. Atteindre cet objectif nécessite de réduire fortement la consommation finale d'énergie.

**% renewables in electricity production**

La représentation des potentiels de réduction de la consommation finale d'énergie montre que pour les scénarios « sobres » et « efficacité énergétique », on est sur une réduction relativement importante. Pour autant, dans les scénarios dits d'efficacité énergétique, on n'est pas forcément sur des ruptures technologiques fortes. Les trajectoires appelées « décarbonation » et « diversification » se traduisent par une faible réduction de la consommation finale d'énergie. La plupart n'atteignent pas le Facteur 4, ou quand elles l'atteignent, on est sur des ruptures technologiques, avec notamment la prise en compte de la capture et du stockage du CO<sub>2</sub> et un fort développement des carburants de seconde génération. L'autre point, pour revenir un peu sur ce qui a été présenté ce matin, est que ces scénarios ne supposent pas les mêmes degrés d'investissement et les mêmes moments d'investissement dans la durée.

Cela suppose de forts investissements en matière d'efficacité énergétique, notamment sur la rénovation des bâtiments. Claude Roy a parlé de technologies qui permettraient de mieux isoler. Cela suppose vraiment d'investir en matière de recherche sur ces questions, et par ailleurs également, sur des infrastructures de transport. Ce scénario permet d'atteindre une réduction par quatre de l'émission de gaz à effet de serre.

Par ailleurs, comme le citait Virginie Schwarz ce matin, nous avons pu réaliser une évaluation macroéconomique de ce scénario. Il est bénéfique en termes de PIB et d'emplois, et notamment il est bénéfique du fait des investissements qui, s'ils sont réalisés, vont permettre par la suite de développer des emplois, qui pour la plupart seraient non délocalisables.



Sur ce point, je voudrais revenir sur les scénarios ADEME et les principaux résultats. Ces scénarios ont été réalisés sur la base des expertises techniques que nous avons en interne. La part des renouvelables en 2050 est relativement importante. On suppose notamment une forte pénétration du biogaz. Cela suppose des investissements relativement conséquents pour pouvoir développer des énergies renouvelables. Par ailleurs, la diminution de la consommation finale d'énergie est importante, elle est divisée par deux.

En conclusion de cette matinée, l'idée est de retenir qu'effectivement les énergies renouvelables ont un rôle important à jouer dans l'objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre, mais qu'il ne faut pas oublier l'enjeu majeur de l'efficacité énergétique et le travail qui reste à faire dans ce domaine. Il faut à la fois travailler sur des évolutions technologiques, mais aussi, sans doute, sur des évolutions de comportement.

## SESSION II

## Comment lever les verrous au déploiement des énergies renouvelables ?

Président de session

**Rémi CHABRILLAT**

Directeur Productions et Énergies Durables de l'ADEME

Après une première session dense qui a bien illustré la richesse, la diversité, l'état et les perspectives de développement des énergies renouvelables vues sous l'angle des différentes filières techniques et industrielles, nous allons maintenant aborder les mesures « transversales » nécessaires pour favoriser ou accélérer ce développement. Nous allons voir dans cette 2ème session, que des défis importants restent à relever pour développer massivement les énergies renouvelables, mais nous verrons aussi les progrès déjà accomplis - ou en cours - pour y parvenir. Le premier enjeu que nous évoquerons est celui de l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau. Les deux premières présentations porteront ainsi respectivement sur le développement des réseaux électriques intelligents, qui sont capables d'intégrer une part importante d'énergies renouvelables variables et sur le stockage électrochimique de l'énergie. Les batteries sont-elles une bonne solution pour stocker l'électricité d'origine

renouvelable ? Il existe une alternative potentielle intéressante, l'hydrogène, obtenu en réalisant l'électrolyse de l'eau lorsque la source renouvelable est disponible, la pile à combustible permettant ensuite de retransformer en électricité l'hydrogène stocké pour satisfaire la demande. Autre défi à relever, moins connu mais crucial : la disponibilité des ressources minérales nécessaires pour réaliser un mix énergétique mondial majoritairement renouvelable. Au-delà des terres rares utilisées dans les éléments d'éoliennes ou de l'indium dans les cellules solaires, aurons-nous suffisamment d'acier et de béton pour des dizaines de TW de solaire ou d'éolien ? Enfin, nous terminerons cette session dédiée aux mesures à prendre pour développer les énergies renouvelables par une présentation des expériences allemande et française, qui nous le verrons, sont sensiblement différentes; toutefois, nous avons beaucoup à apprendre de chacune d'elle.

## I. Intégration et stockage des énergies renouvelables

### INTÉGRATION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES AU RÉSEAU : ENJEUX TECHNOLOGIQUES, ÉCONOMIQUES ET ORGANISATIONNELS DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES INTELLIGENTS

Nouredine HADJSAID

Professeur à l'INP Grenoble, laboratoire G2ELAB, CNRS

C'est un grand plaisir de partager avec vous quelques réflexions sur l'intégration des énergies renouvelables au réseau électrique. Ma présentation sera consacrée aux défis que représente cette intégration et aux réseaux électriques intelligents. Certains intervenants les ont déjà mentionné dans le contexte d'un changement de paradigme énergétique.

De quoi s'agit-il ? Il y a tout d'abord le réseau électrique auquel les énergies renouvelables doivent être intégrées, avec ses différentes structures. Il faut savoir que le réseau électrique est constitué de deux composants principaux : le réseau de transport, qui inclut des infrastructures dont les tensions sont supérieures à 63 kilovolts (pour le cas français), et le réseau de distribution, qui est conçu avec des

caractéristiques spécifiques. En principe, toutes les productions centrales sont intégrées au réseau de transport, qui est déjà relativement intelligent. Il est en effet doté des technologies les plus avancées nécessaires pour garantir la sécurité du système global. Ce réseau est basé sur des technologies maillées pour assurer la redondance des flux d'énergie en cas d'urgence. Il constitue la colonne vertébrale du réseau d'alimentation complet et transporte d'énormes flux d'énergie. Il doit cependant faire face à de nouvelles difficultés principalement liées à l'intégration de sources d'énergie renouvelables à grande échelle, l'intégration des marchés au niveau européen et une observation intelligente de réseaux externes au niveau transversal-continental (pays voisins) ou au niveau vertical-distribution. L'autre partie, la plus conséquente, est constituée par le réseau de distribution.

Ce composant a été conçu avec pour objectif de fournir toute la puissance ou l'énergie disponible à l'utilisateur final. Cette conception historique était en effet justifiée par le fait qu'à ce niveau de tension, la production d'énergie est quasiment inexistante.

Je vais présenter ce système dans les grandes lignes. En France, il couvre plus de 1 300 000 km, ce qui représente plus de 3 fois la distance de la Terre à la Lune. Comme je vous l'ai indiqué, la distribution a été conçue dans un esprit spécifique : allier simplicité et économie en n'injectant pratiquement pas d'énergie. Les générateurs distribués (principalement des énergies renouvelables) sont censés être intégrés au niveau de la distribution, qui n'est pas prévue pour une production à grande échelle. Je ne développerai pas les impacts des énergies renouvelables sur le réseau de transport. Au niveau de la distribution, les impacts techniques peuvent être positifs ou négatifs en fonction de différents facteurs tels que l'emplacement du générateur distribué, l'état du réseau, le profil et la taille du générateur distribué, etc. Par ailleurs, la plupart de ces générateurs sont basés sur des sources d'énergie renouvelables présentant une forte variabilité. En fait, ils affichent des caractéristiques spécifiques, que je vous présenterai plus tard.

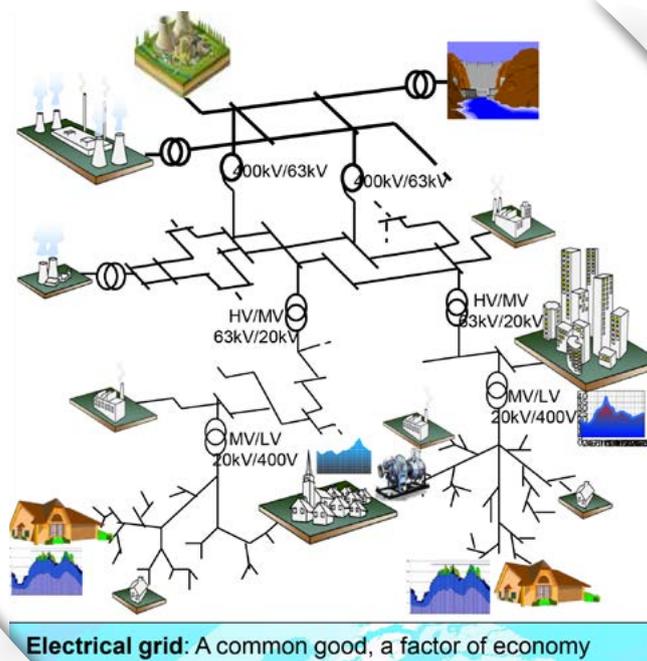
L'autre point, c'est que, comme nous, les composants matériels de cette infrastructure électriques vieillissent. Je vais vous expliquer cela en quelques mots. Le système français a aujourd'hui 30 ans en moyenne, ce qui est relativement jeune comparé à d'autres réseaux. Nous disposons également de statistiques qui montrent qu'après 30 ans, le taux de pannes grimpe en flèche, ce qui peut affecter la qualité du service et engendrer des coûts pour la société. Aujourd'hui, personne n'accepte une qualité insuffisante de la distribution d'électricité ou simplement de ne pas avoir accès à l'électricité pour les besoins de base du quotidien.

Dans ce contexte, l'évolution du réseau pose un véritable défi dans la manière dont le changement de paradigme s'opère pour l'ensemble du secteur. Auparavant, l'électricité était principalement issue d'une production centrale, fournie par des dizaines de générateurs centraux. Aujourd'hui, la production est décentralisée et assurée par des générateurs de plus petite taille et on observe une évolution rapide du nombre d'unités installées et un manque d'observabilité et de contrôlabilité, ce qui est très problématique pour le réseau électrique.

Je vais vous donner à nouveau quelques chiffres. Vous avez probablement observé l'évolution de l'éolien et du solaire dans le monde. Entre 2006 et 2010, le nombre de générateurs a fortement augmenté. Cela représente à la fois un avantage et un défi. Plus de 300 000 unités sont actuellement interconnectées au niveau de la distribution, avec un débit rapide, mais une capacité installée globale d'environ 10 GW. C'est là que réside la plus grande difficulté. En revanche, l'essentiel de la production centrale provient d'une centaine d'unités qui peuvent être surveillées, contrôlées et réparties.

Parmi les caractéristiques qui sont toujours mentionnées, il y a la puissance délivrée par ces sources. La puissance doit être considérée du point de vue du réseau d'alimentation. Par exemple, pour une ferme éolienne dont la capacité s'élève à 10 MW, le taux de variabilité est élevé. Vous serez toujours confrontés à ce type de variabilité et c'est un cauchemar pour le réseau lorsque le taux de pénétration commence à compter. Il faut considérer cela à grande échelle sur une base annuelle et non sur un point dans l'année.

Si on prend l'exemple de la puissance délivrée par une ferme photovoltaïque d'une capacité maximale de 4 MW dans le Sud de la France. C'est une région ensoleillée et nous avons enregistré les données au mois de mai, qui est une période assez favorable.



Même à la puissance maximale, la production de cette ferme montre de fortes augmentations ou diminutions. Comme vous le savez, cette fluctuation est due au passage de nuages au-dessus de la ferme. Par rapport à une capacité installée de 100 GW, 4 MW semblent dérisoires. Mais à grande échelle, cela représente une difficulté pour le réseau. Il y a également un lien avec les véhicules électriques, mais je n'aborderai pas ce sujet. Je suis désolé d'être un peu technique, mais nous ne pouvons pas ignorer les impacts techniques, car nous devons évaluer les impacts globaux de ces contraintes sur le réseau. Si une panne de courant entraîne une indisponibilité du réseau, il est impossible d'utiliser cette énergie renouvelable. Nous disposons de chiffres à ce sujet. Il y a une limite supérieure à la tension. Nous avons enregistré sur une année les chiffres d'un réseau spécifique, sans production éolienne, et les tensions sont comprises dans les limites. Nous avons également enregistré les chiffres intégrant la production éolienne. Les limites ont été fréquemment dépassées, ce qui n'a pas été sans conséquences sur l'équipement. Celui-ci a en effet subi des contraintes qui peuvent à terme entraîner des défaillances.

Cela s'applique à l'impact sur les harmoniques, que nous avons également suivi. Nous avons enregistré les chiffres sur un poste de transformation secondaire, le transformateur MT/BT. Ce transformateur alimente une ligne située en aval avec de nombreux panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un village photovoltaïque. Il y a de nombreuses harmoniques au niveau de ce transformateur, ce qui n'est pas sans effets sur l'équipement. Cela a également un impact sur les pertes techniques, car on entend parfois dire que lorsqu'une source d'énergie est proche du consommateur, les pertes diminuent, ce qui est vrai dans certains cas, mais pas avec une pénétration à grande échelle des générateurs distribués.

Nous avons cependant mené une étude de grande ampleur dont les résultats montrent qu'à un certain niveau de pénétration, généralement moins de 10 %, les pertes sont réduites. En revanche, les pertes augmentent au-delà de ce niveau, ce qui doit être pris en compte. On constate également un impact économique, mais je ne développerai pas ce point.

Le système devient complexe, ce qui renforce sa vulnérabilité et augmente le coût. C'est pourquoi nous avons besoin d'une technologie nouvelle et plus intelligente. L'intelligence touchera l'ensemble de la chaîne énergétique, mais principalement côtés distribution et client. Nous sommes censés avoir une charge variable et une production qui suit cette charge pour maintenir la contrainte physique du système : préserver constamment l'équilibre entre la production et la consommation.

Mais à présent, la production varie également du fait des énergies intermittentes. Dans ce cas, qu'est-ce qui contrôle quoi et qui contrôle qui pour préserver l'équilibre du système ?

Car c'est une réalité physique pour le réseau. Nous devons maintenir cet équilibre en permanence pour éviter toute panne de courant, qui pourrait mettre en péril la sécurité de l'ensemble du système. L'idée ici, c'est que la charge peut contrôler la production et ainsi contribuer à cet équilibre, dans des conditions normales comme en cas d'urgence. Pour moi, c'est à ce niveau que ce réseau intelligent constitue une révolution. Les clients peuvent participer activement à l'équilibrage en contrôlant la charge ou la réponse à la charge, si la technologie est présente, le modèle économique viable et le client prêt.

J'ai classé certains des défis dans des catégories. Ces défis sont liés à des lacunes scientifiques et technologiques. Il y a en premier lieu la complexité croissante et la nécessité de prendre en compte le cadre stochastique introduit par ces énergies et les incertitudes de plus en plus nombreuses. Nous gardons également en tête qu'il s'agit de gros systèmes, qui se comportent comme des systèmes de systèmes. De plus, nous nous appuyons sur l'existant, avec les avantages et les inconvénients que cela comporte.

Le deuxième point consiste à combiner flexibilité du système, gestion d'un réseau de stockage et consom'acteurs. Le troisième point concerne l'intégration des technologies de l'information et de la communication à l'énergie alors que ces infrastructures interconnectées sont de plus en plus interdépendantes. C'est là que nous nous heurtons à des limites scientifiques sur les interactions numériques et physiques, notamment en termes de modélisation d'infrastructures hétérogènes, de compréhension des effets de cascade et de modes partagés. Le niveau d'intelligence fait également débat : il faut faire un choix entre décentralisation et centralisation tout en tenant compte du besoin d'intégration sociétale et économique.

Je conclurai en disant que les énergies renouvelables ont le vent en poupe, c'est indéniable. Du point de vue du système électrique, l'intégration de ces énergies non traditionnelles représente des défis majeurs lorsqu'elle est combinée à la réalité des réseaux d'alimentation et à leurs contraintes actuelles. Les défis techniques, économiques et industriels sont nombreux. Il nous faut également garder à l'esprit que nous n'avons pas une vue d'ensemble de ce qu'il se passe sur le système. Les impacts sont à la fois locaux et globaux. Un problème en mer du Nord lié aux énergies renouvelables ou à autre chose peut affecter toute l'Europe.

Mais il ne s'agit pas de dresser un tableau sombre de la situation. Il faut au contraire être optimiste, car ces domaines de recherche présentent de belles opportunités d'innovation. Bien sûr, il reste des lacunes scientifiques et technologiques, mais vous le savez, ces problèmes ont forcément des solutions, nous ne les avons simplement pas encore trouvées. Pour nous tout du moins, les réseaux intelligents montent en puissance.

## STOCKAGE DE L'ÉLECTRICITÉ : CAS DU STOCKAGE ÉLECTROCHIMIQUE

**Jean-Marie TARASCON**

*Professeur à l'université de Picardie, Directeur du Réseau sur le stockage Electrochimique de l'énergie (RS2E), membre de l'Académie française des Sciences*

J'ai vu beaucoup de transparents aujourd'hui et beaucoup de prévisions en termes exponentiels. Je suis ici pour vous parler du stockage de l'énergie, un sujet beaucoup plus mesuré et moins impressionnant que ceux abordés précédemment. Je vais commencer par une présentation rapide des besoins liés au stockage de l'énergie. Pendant de nombreuses années, l'équilibre écologique de notre planète était plus ou moins maintenu et les êtres humains s'appuyaient sur les ressources biologiques. Les progrès technologiques ont considérablement augmenté la part des combustibles fossiles. Dans le monde entier, nous atteignons ce fossé dont tout le monde parle. Et nous sommes également confrontés à la pollution.

Au cours des 30 prochaines années, nous devons doubler la production d'énergie. Tout le monde place de grands espoirs dans les énergies renouvelables, mais comme vous le savez, ces énergies sont intermittentes. L'intervenant précédent a parlé du réseau pour la réalisation d'économies à grande échelle et la gestion de la grande variabilité des énergies. Cela signifie que nous pouvons équilibrer l'offre et la demande. Quel que soit le niveau de cette offre et de cette demande, nous devons avant tout stocker des quantités massives d'énergie pour améliorer la variabilité et la qualité du réseau, ainsi que les intégrations.

Quel est le scénario actuel ? Si nous prenons l'exemple des États-Unis, seuls 2,5 % de l'électricité produite sont stockés, dont 98 % dans des centrales hydroélectriques de pompage. Dans ce cas, les batteries représentent seulement 451 MW. Je pense que ce chiffre peut évoluer. Nous sommes à environ 10 % en Europe et 15 % au Japon. Les batteries représentent un marché étendu et très lucratif pour les véhicules électriques, mais aussi pour les applications stationnaires. Mon message est très simple : comment y parvenir ?

Les opportunités sont nombreuses, mais quels sont les systèmes ? J'ai tenté de résumer les différentes technologies de batteries. Même sur le court terme, vous pouvez considérer que la capacité dépend de la puissance nominale du système. Voilà ce dont vous avez besoin. Il existe différentes gammes de puissance pour les systèmes d'alimentation sans coupure. Nous disposons de nombreuses solutions, mais aucune n'est idéale. Nous n'avons aucune idée de ce à quoi ressemblera la technologie des batteries pour le stockage de masse.

J'aimerais m'intéresser de plus près à deux technologies avant de passer à la suite. La meilleure technologie, qui est utilisée actuellement, est la batterie sodium-

soufre. Il y a également les batteries lithium-ion, dont nous entendons beaucoup parler, qui alimentent les ordinateurs portables et les véhicules électriques.

Je vais prendre le cas des batteries haute température sodium-soufre. Je ne vais pas entrer dans les détails chimiques, mais la caractéristique principale ici est que ces batteries fonctionnent à 200°C et produisent environ 900-1000 W/kg sur environ 1000 cycles. Nous avons indiqué ce qui a été installé et ce qui est plus ou moins utilisé à présent. Il existe différents types d'obstacles à l'exploitation ou à la gestion des fermes éoliennes ou solaires. Mais la sécurité reste un problème. Il y a deux jours, l'une de ces centrales a pris feu.

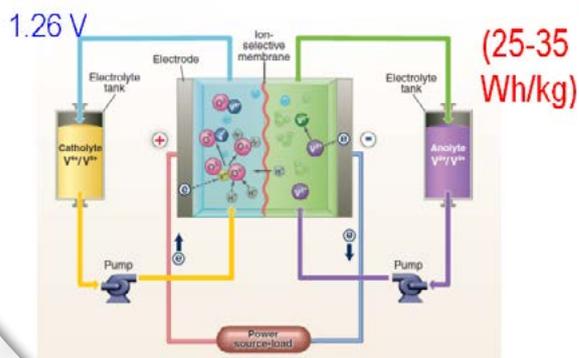
D'un autre côté, vous avez la technologie lithium-ion. Mais cette technologie peut-elle être appliquée aux réseaux ? D'un point de vue chimique, c'est une technologie remarquable. Ces batteries contiennent un grand nombre de panneaux de cathodes ou d'éléments électriques positifs et négatifs. Je dirais que vous pouvez obtenir une densité d'énergie relativement stable d'environ 210 Wh/kg, voire une capacité comprise entre 1 et 10 kW.

Nous savons que cette technologie est adaptée aux solutions portables et qu'elle va pénétrer le marché du chauffage. Mais nous ne pensons pas qu'elle pénétrera largement le marché des énergies renouvelables, et ce pour une raison très simple. Lorsque nous parlons de l'association des énergies renouvelables et du réseau, deux paramètres sont très importants : le faible coût et la gratuité de la maintenance. Voilà ce qu'il faut garder en tête. Automatiquement, nous pensons au lithium-ion. Il serait très utile de proposer des démonstrations.

Il existe également de nouvelles technologies qui vont au-delà du lithium-ion, notamment la technologie lithium-air. Les chiffres sont assez impressionnants : 3500 Wh/kg pour le lithium-air et plus de 2500 pour le sodium-soufre, soit 8 à 10 fois plus que le lithium-ion. Vous pourriez penser qu'avec l'air, nous avons la solution. Nous avons mené de nombreuses recherches, mais les attentes étaient trop fortes et nous n'avons pas pu concrétiser ce qui avait été imaginé. Vous pourriez continuer à travailler longtemps sur le lithium-air, mais ne comptez pas trop dessus pour votre ferme.

Je vais passer directement aux batteries à flux redox. De quoi s'agit-il ? Ce sont des batteries dans lesquelles circulent deux solutions redox formant les électrodes positive et négative. Dans ce cas, vous avez un réservoir qui vous permet d'ajuster la capacité de vos systèmes.

## ➤ Classical redox flow: VRB



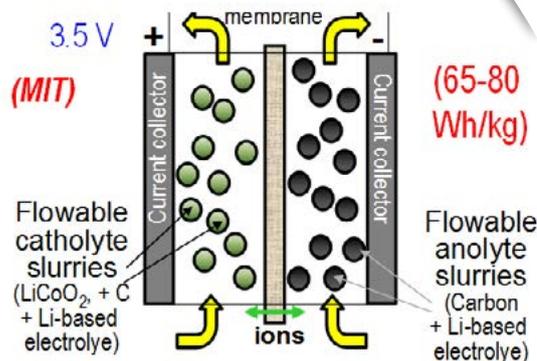
Vous pouvez également ajuster la puissance en modifiant le nombre de piles dans les éléments. Ce système existe depuis les années 70, mais n'a jamais vraiment percé sur le marché.

Récemment, un groupe du MIT a fait le buzz avec des systèmes similaires au lithium. Ils ont automatiquement pu atteindre des tensions supérieures. La principale amélioration qu'ils ont apportée a consisté à remplacer les solutions par de l'encre contenant des particules en suspension, ce qui a permis d'augmenter la concentration des électrodes et de renforcer la densité énergétique. Ils ont de cette façon pu atteindre 65-80 Wh/kg. Une fois encore, c'est très excitant sur le papier, mais nous sommes toujours limités d'un point de vue économique. Cela n'aurait de sens que si nous revenions aux systèmes aqueux pour atteindre un faible coût par kWh.

Il existe un autre type de système qui fait beaucoup parler et qui me semble plus réaliste : la technologie sodium-ion. Les caractéristiques chimiques sont plus ou moins identiques à celles de la technologie lithium-ion, mais le lithium est remplacé par du sodium. J'ai inclus des résultats récents. Si vous les regardez attentivement, vous pouvez voir que le passage du lithium au sodium permet de s'affranchir de la question de limitation des ressources. Le carbonate de sodium est bien moins cher que le carbonate de lithium, ce qui vous permet de réduire les coûts. Vous n'avez par ailleurs plus besoin de cuivre pour le collecteur de courant négatif, ce qui se traduit par une diminution supplémentaire du coût. Cette baisse est estimée autour de 40 %.

Ce fait est bien connu, mais cette technologie doit devenir une référence et il se trouve qu'un programme travaille actuellement dessus dans le cadre du « hub » français, qui réunit entre autres des laboratoires de recherche et le CEA.

## ➤ New Li-ion redox flow:



Je suis intimement persuadé que cette technologie sera disponible dans les 10 prochaines années. Et je pense que pour couvrir tout le domaine de recherche, nous avons besoin de définir une structure. Par chance, la France a procédé à cette structuration il y a 2 ou 3 ans en créant le « hub », qui abrite le réseau sur le stockage électrochimique de l'énergie.

Maintenant, si vous me demandez comment je vois l'avenir, je resterai très modeste et réservé. Une nouvelle fois, mes prévisions concernent des systèmes à bas coût dont la maintenance est gratuite. Ce sont plus ou moins les facteurs déterminants pour ces types d'applications. Des démonstrations d'utilisations spécifiques du lithium-ion seront de toute façon effectuées. D'ailleurs, la société A123 dispose déjà d'un démonstrateur d'environ 16 MW. La technologie sodium-sulfure conservera son niveau actuel. Je pense vraiment que dans les 10 années à venir, le sodium-ion se positionnera comme un concurrent sérieux. Soyons réalistes.

Nous avons ensuite le flux redox. Si nous parvenons à orienter cette technologie chimique dans la bonne direction, nous passerons à un système écologique. Un jour peut-être, nous bénéficierons du lithium-air, si son développement n'est pas constamment retardé, à la manière de celui des piles à combustible. Voici plus ou moins ma vision du stockage d'énergie de demain.

## STOCKAGE DE L'HYDROGÈNE ET PILES À COMBUSTIBLE

### Thierry PRIEM

Responsable Programme Hydrogène et Piles à Combustible au Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Énergies Nouvelles et les Nanomatériaux, CEA/LITEN (France)

J'ai 10 minutes pour vous parler de l'hydrogène et des piles à combustible et j'espère que je me montrerai à la hauteur. Tout d'abord, comme vous le savez, l'hydrogène ne constitue pas une source d'énergie primaire sur Terre. Nous devons donc le produire, principalement à partir d'énergie fossile et de gaz naturel. Mais il peut également être produit à partir d'eau, par électrolyse.

Les électrolyseurs d'eau utilisent différentes technologies, la principale étant l'électrolyse alcaline. Ce système, actuellement disponible sur le marché, est parfaitement adapté à la production d'hydrogène de base. D'un autre côté, il existe également des électrolyseurs PEM (membrane électrolytique polymère) basse température. Des appareils de ce type de faible puissance sont actuellement disponibles dans le commerce. D'autres sont également en cours de développement. Ce type d'électrolyseur est parfaitement adapté à la production d'électricité intermittente, telle que les énergies renouvelables (photovoltaïque ou éolienne).

Il existe un troisième type d'électrolyseur, à haute température, qui peut fonctionner jusqu'à 800°C. Malheureusement, il n'est pas encore commercialisé, car il est toujours en phase de développement en laboratoire. Cet appareil nécessite des sources de chaleur qui peuvent être des énergies renouvelables telles que le solaire à concentration ou bien une centrale nucléaire. Il peut être destiné à une utilisation locale, par exemple pour la centrale de traitement des déchets d'une ville. Intéressons-nous maintenant à l'ensemble de la chaîne hydrogène. Comme je l'ai dit, nous devons produire de l'hydrogène sous sa forme  $H_2$  à partir de combustible fossile ou d'eau. Une fois l'hydrogène produit, nous

devons encore le transporter et le stocker. J'ai indiqué les principales utilisations actuelles de l'hydrogène.

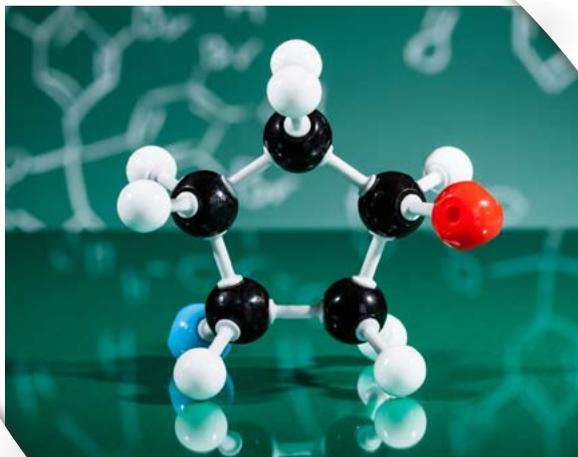
Le secteur chimique et les usines chimiques sont les premiers utilisateurs d'hydrogène. Ce gaz est cependant de plus en plus souvent utilisé comme vecteur énergétique, principalement pour les moteurs thermiques. J'ai inclus l'exemple d'une fusée Ariane équipée du moteur Vulcain. Mais l'hydrogène pourrait être utilisé dans des piles à combustible fournissant simultanément 50 % de chaleur et 50 % d'électricité. Il est très important de choisir la chaîne appropriée pour produire de l'hydrogène. Nous sommes favorables aux énergies renouvelables, à la biomasse, aux centrales hydroélectriques, aux énergies vertes et à l'énergie solaire.

Voyons maintenant quelle est la situation dans le monde. L'hydrogène n'est pas au même stade de développement dans tous les pays. Pour le moment, quatre pays sont particulièrement engagés dans le développement de l'hydrogène et de la pile à combustible : les États-Unis, le Japon, la Corée du Sud et l'Allemagne.

Comment établir un lien entre l'hydrogène et les énergies renouvelables ? C'est un véritable sujet d'actualité. Le premier exemple est la possibilité d'utiliser l'hydrogène pour stocker les énergies renouvelables. Comme l'a expliqué Jean-Marie Tarascon, nous pouvions auparavant utiliser le stockage électrochimique pour stocker les énergies renouvelables. L'hydrogène offre un deuxième moyen d'y parvenir.

Le projet MYRTE (mission hydrogène renouvelable pour l'intégration au réseau électrique) déployé en Corse est un bon exemple. Ce projet s'appuie sur une centrale photovoltaïque pour produire de l'électricité supplémentaire, qui peut ensuite être transformée en hydrogène et en oxygène via un électrolyseur. L'électrolyseur se trouve dans un bâtiment tandis que l'oxygène et l'hydrogène sont stockés dans des réservoirs. Lorsque nous avons besoin d'électricité pour l'écrêtage des pointes, nous utilisons une pile à combustible pour transformer l'hydrogène et l'oxygène en électricité. Ce projet lancé il y a 2 ans offre aujourd'hui une capacité de 250 kW.

L'hydrogène peut également être utilisé pour établir un lien entre les énergies renouvelables et la mobilité. J'entends par là le transport. Voici l'exemple de la California Hydrogen Highway entre Los Angeles et San Francisco. Actuellement, plus de 250 voitures et environ 20 autocars à hydrogène circulent entre les 2 villes.



Modèle de molécules d'hydrogène

Ces véhicules ont besoin de stations, c'est pourquoi près de 40 stations à hydrogène ont été installées en Californie. Certaines d'entre elles disposent également d'installations photovoltaïques pour la production d'hydrogène in situ.

La troisième utilisation de l'hydrogène est la production d'énergie domestique. Il existe une micro-cogénération (mCHP) qui produit simultanément de la chaleur et de l'électricité au niveau local, par exemple pour les habitations individuelles ou les immeubles. Aujourd'hui, nous pouvons parler de chaîne hydrogène partielle, car l'énergie primaire est le gaz naturel ou le biogaz. Nous transformons le méthane en électricité et en chaleur grâce à une unité de reformage interne. Mais nous pourrions disposer dans un avenir proche d'une chaîne hydrogène complète qui nous permettrait de produire directement de l'hydrogène à partir d'un panneau photovoltaïque ou d'une éolienne. L'hydrogène serait donc produit localement à partir d'énergies renouvelables et pourrait être utilisé dans les habitations, les supermarchés, les bureaux, etc. La chaîne hydrogène pourrait fonctionner à tous les niveaux avec des énergies renouvelables sur des sites locaux.

Nous tentons à présent de nous concentrer sur le futur marché de l'hydrogène et des piles à combustible. Ces ressources ont été utilisées la première fois dans le cadre des programmes spatiaux américains. Leur utilisation ultime pourrait être dédiée à une production de masse pour des applications automobiles. Il existe des marchés précoces, tels que la manutention, les systèmes de secours, la micro-cogénération, etc.

Nous disposons de chiffres concernant le déploiement de la technologie. Il y a actuellement plus de 4000 chariots élévateurs en activité aux États-Unis et plus

de 14 000 piles à combustible au Japon, principalement issues du programme ENE-FARM. Plus de 2000 piles à combustible équipent des systèmes de secours dans le monde. Plus de 50 autocars et plus de 300 véhicules légers à piles à combustible sont en activité à l'échelle mondiale. Je parle ici de véhicules de particuliers. Vous avez environ 200 stations à hydrogène.

La constitution d'une véritable économie de l'hydrogène se heurte à certaines difficultés. Comme nous l'avons vu précédemment, il est important de réduire l'empreinte carbone de la production d'hydrogène, ce qui implique de développer l'électrolyse renouvelable. Nous devons réduire le coût de production de l'hydrogène pour atteindre l'objectif fixé à moins de 2 €/kg.

Pour ce qui est du stockage et de la distribution, nous devons démontrer la sécurité des modes de fonctionnement nominal et de défaillance des stations à hydrogène et du stockage embarqué pour la mobilité. Nous devons également réduire le coût des réservoirs d'hydrogène, car il est actuellement très élevé, si l'on veut respecter les objectifs des équipementiers. Il est également important d'harmoniser la normalisation et les normes de déploiement des stations à hydrogène et de réduire les coûts de livraison de l'hydrogène à moins de 4 €/kg.

En ce qui concerne les piles à combustible, la priorité est d'améliorer leurs performances. Par exemple, nous devons réduire le coût de l'ensemble du système à 3000 €/kW pour les véhicules utilitaires lourds et 30 €/kW pour les véhicules utilitaires légers. En parallèle, nous devons augmenter la durabilité à 40 000 heures pour les applications stationnaires et 5000 heures pour le transport.

## II. Vers une économie circulaire

### MATIÈRES PREMIÈRES ET MÉTAUX STRATÉGIQUES

**Olivier VIDAL,**

*Directeur de recherche au CNRS, Coordinateur du programme européen ERA-MIN*

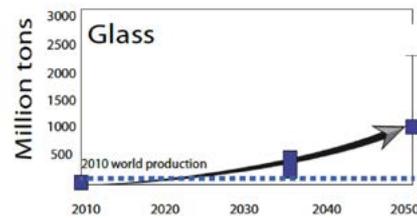
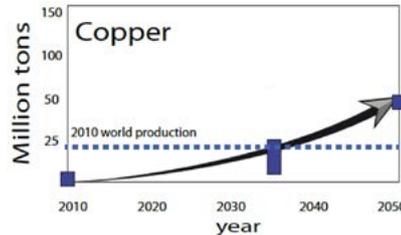
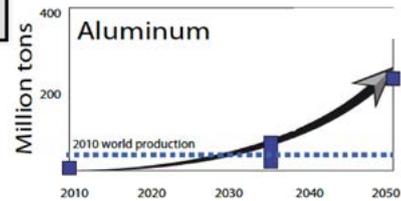
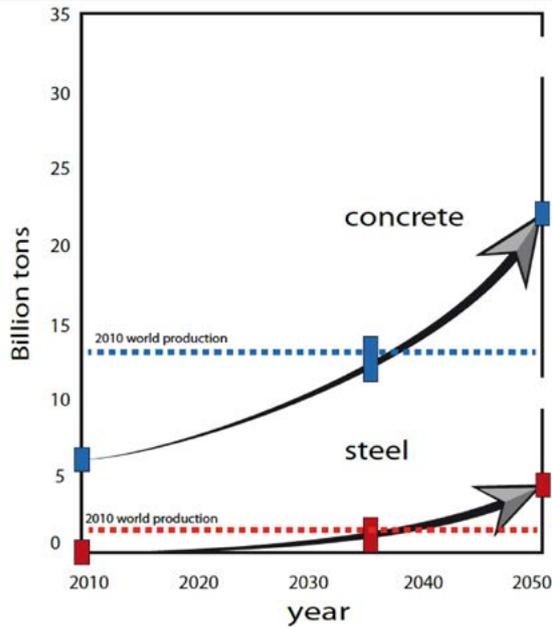
**M**a présentation sera consacrée au lien entre l'énergie qui peut être produite par des installations solaires et éoliennes et les ressources minérales. Ce lien peut vous sembler un peu étrange ou tout du moins peu évident. Mais nous ne devons pas oublier que toutes les installations que nous prévoyons de construire dans les années à venir nécessitent de nombreuses matières premières très variées. Cela inclut des métaux, mais aussi le béton et le verre par exemple, comme nous le verrons plus tard. Nous devons donc veiller à ce que la disponibilité ou la non-disponibilité de ces ressources minérales ne limite en aucun cas le développement de ces installations éoliennes

et solaires.

Si l'on regarde les scénarios proposés par l'Agence Internationale de l'Énergie pour les 40 prochaines années, on s'aperçoit de l'importance du solaire et de l'éolien dans le mix énergétique, et on voit qu'elle va augmenter très sérieusement. On est actuellement à des puissances de l'ordre de 1000 térawatts-heures et on devrait passer à 25 000 TWh en 2050.

Comme il a été indiqué précédemment, quand on parle de sources solaires et de sources éoliennes, il y a deux problèmes, à savoir l'intermittence de ces ressources mais également leur dilution importante.

## Materials requirements for wind and solar facilities



Les besoins en matériaux des installations éoliennes et solaires

Et cette dilution nécessite de grandes installations pour produire de l'énergie. Par exemple, dans le cas d'une éolienne de 3,5 mégawatts, il faut entre 700 et 800 tonnes d'acier. Donc on a une quantité d'acier embarqué de l'ordre de 250 tonnes par mégawatt. Le solaire, c'est un petit peu plus, de l'ordre de 300 tonnes. Et dans les deux cas, c'est bien supérieur aux quantités embarquées dans des installations qui utilisent du combustible fossile, que ce soit du charbon, du gaz ou même du combustible nucléaire.

Cette observation faite pour l'acier, on peut la faire pour d'autres matières premières, le béton, le verre, l'aluminium, le cuivre etc. Si l'on combine les quantités de matériels embarqués avec les scénarios dont j'ai parlé précédemment, on peut essayer de calculer la quantité de matière première qui va être immobilisée dans les installations à la fois solaires et éoliennes, jusqu'à 2050. Donc il s'agit ici de quantités cumulées. Et l'observation que l'on peut faire, est que d'ici 2050 la quantité totale de béton, d'acier, d'aluminium, de cuivre et de verre, devra correspondre à deux à huit fois la production mondiale de 2010.

Il y a des incertitudes énormes sur ces prédictions, c'est très clair. Ce sont des données publiées, et on peut avoir des scénarios encore beaucoup plus pessimistes.

Quoi qu'il en soit, on peut se poser une question. Est-ce que deux à huit fois la production de 2010, c'est beaucoup, c'est faisable, et faut-il s'en inquiéter ? Si l'on répartit cette quantité de matière première sur 40 ans, cela devrait nécessiter une augmentation de 0,15 à 1 % de la production mondiale chaque année. Est-ce beaucoup ? Si l'on compare aux productions et à l'augmentation de la production que l'on enregistre depuis les années 2000, c'est beaucoup moins puisque depuis les années 2000, on a eu une envolée de

production des matières premières de l'ordre de 5 %, pour l'aluminium, c'est également vrai pour tous les métaux.

Cette augmentation est principalement tirée par l'émergence des pays en voie de développement, les BRIC, mais principalement la Chine qui consomme actuellement 40 % de l'acier produit mondialement et 30 % de l'aluminium et du cuivre.

5 %, c'est énorme. C'est tellement énorme que cela veut dire que l'on double la production tous les quinze ans, c'est exponentiel.

J'espère honnêtement que cela va se stabiliser, parce que le fait de doubler la production notamment d'acier tous les 15 ans pendant 40 ans, va avoir un impact - au moins environnemental - très important.

Si l'on regarde dans le passé, on s'aperçoit que durant les années 50, juste après la guerre, jusqu'en 1975 environ, on a déjà eu des productions qui ont augmenté avec des taux énormes, de l'ordre de 7 %. Et puis, on a eu une stabilisation pendant la période de 1970 à 2000. C'est le cas pour l'aluminium et pour quasiment tous les métaux.

Jusqu'à 2050, il faudra avoir une augmentation de la production d'aluminium, juste pour les secteurs de l'éolien et du solaire, qui correspond à l'augmentation que l'on a vécue dans les années 70 à 2000 tous secteurs industriels confondus.

Quand on voit cela, on peut se demander s'il faut s'inquiéter. Cette observation est faite pour l'aluminium, le cuivre et le fer. Il faut environ 4 milliards de tonnes d'acier pour produire le parc éolien et le parc solaire que l'on anticipe d'ici 2050, ce qui n'est tout de même pas tout à fait négligeable.

Les optimistes répondront que dans le passé, on a déjà doublé les productions de métaux tous les 20 à 30 ans. Mais ce qui a été possible dans le passé n'est pas forcément souhaitable dans le futur pour deux raisons.

La première est que d'une manière générale, on observe une diminution de la concentration des gisements de matières premières, et principalement des métaux que l'on veut exploiter. On a une diminution de la teneur générale des gisements, ce qui a pour conséquence d'augmenter l'énergie nécessaire à l'extraction de ces matières premières. Et cette énergie augmente de manière exponentielle. On augmente également la quantité de déchets solides produits, donc de terrils. On augmente la quantité de CO<sub>2</sub> produit puisque l'on a besoin de plus d'énergie.

Il faut tenir compte de tout cela. Il faut bien comprendre que les besoins en matières premières ont un coût environnemental évident.

Jusqu'à présent, j'ai parlé des métaux de base, mais vous avez dû suivre un peu l'actualité, notamment il y a deux ou trois ans. On parlait beaucoup de terres rares et de petits métaux, d'éléments un peu exotiques.

Une étude récente montre qu'entre 2010 et 2030, la demande mondiale en éléments pour le moins exotiques (gallium, indium, sélénium, tellure, dysprosium, néodyme, praséodyme, terbium) tirée par les secteurs solaire et éolien, devrait augmenter de manière très significative, avec des augmentations de 10 à 230 % de la production 2010 mondiale.

Il faut également comprendre que ces éléments ne sont pas uniquement utilisés dans le secteur des énergies renouvelables. En effet, ils sont utilisés dans toutes les hautes technologies. C'est particulièrement vrai pour les technologies de l'information et de la communication, les luminophores et le transport. Au début des années 80, on utilisait dix éléments pour faire un ordinateur, maintenant on en a besoin de 55. Il va y avoir en plus un effet de compétition.

En conclusion, je ne veux pas dresser un tableau trop dramatique, mais juste montrer que le développement de ces technologies vertes va dépendre de la

disponibilité de matériaux, parce que l'on a besoin de quantités de matières très importantes.

Je n'ai considéré que le secteur des éoliennes et du solaire. Le problème se posera aussi sur tout ce qui est stockage de l'énergie, la distribution, les véhicules hybrides et électriques.

Il faut bien comprendre que la durée de vie d'une éolienne ou d'un panneau solaire est de l'ordre de 20 à 30 ans. Donc pendant 20 à 30 ans, on ne pourra pas faire de recyclage. Le recyclage n'est pas une solution ici. Il faut travailler sur le recyclage, il n'y a aucune ambiguïté là-dessus, mais ce n'est pas la solution unique.

Est-ce qu'il faut se faire du souci ? En tout cas, il faut être attentif. Et il faut éviter de développer des technologies complètement découplées des réalités d'approvisionnement en matières premières. Il faut essayer d'optimiser le rapport entre l'efficacité, le rendement des installations que l'on construit, et le besoin en matières premières.

Actuellement, on fabrique des éoliennes dont les aimants permanents contiennent 600 kilos de terres rares par mégawatt, dont du dysprosium dont je parlais tout à l'heure. C'est un élément extrêmement rare avec des monopoles de production, donc des tas de problèmes géopolitiques derrière. On sait faire des éoliennes sans aimants permanents. Je ne dis pas qu'il faut les faire, mais les éoliennes de générations précédentes n'avaient pas d'aimants permanents et fonctionnaient quand même.

Il faut évidemment quantifier l'impact de toutes les nouvelles technologies avant leur implémentation à l'échelle industrielle. Et il va falloir trouver les ressources nécessaires, augmenter l'efficacité de l'extraction et du raffinage des métaux, et diminuer l'impact environnemental au maximum. Les miniers et les gens qui raffinent les métaux s'orientent beaucoup dans cette direction.

Comme on l'a vu ce matin, le développement des parcs éoliens et solaires est très rapide. Il ne faut surtout pas prendre de retard sur ces questions.

### III. Retour d'expériences

#### CAS DE L'ALLEMAGNE

**Franz ALT**

*Journaliste, spécialiste des énergies renouvelables, Allemagne*

Les économies et les politiques énergétiques actuelles sont à bout de souffle. Notre programme économique est suicidaire. Nous consommons en une journée autant de charbon, de gaz et de pétrole que la nature en a créé en 1 million de jours.

Quelle solution apporter à ce problème ? Par le passé, les changements de température étaient minimes, mais le problème des gaz à effet de serre est apparu il y a 150 ans avec la révolution industrielle.

Cette anomalie est un phénomène à la fois singulier et unique sur les 450 000 dernières années, et constitue aujourd'hui notre principal problème. Il y va de notre survie. Ces informations sont tirées d'une étude menée en 2000 par le GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), qui travaille sous l'égide des Nations Unies. En voici les résultats. Si nous conservons nos habitudes en matière d'énergie, le réchauffement climatique pourrait atteindre 8 degrés d'ici la fin du siècle. Je n'aimerais pas être à la place de mes petits-enfants.

Je vais maintenant vous présenter un scénario sur la consommation d'énergie qui a été commandé par l'Union européenne il y a 20 ans. En 1990, le pétrole représentait la part la plus importante de la consommation d'énergie suivi par le gaz naturel et le charbon. Les énergies renouvelables figuraient en dernière position, représentant une part minime de l'énergie consommée. Voyons maintenant ce qui nous attend en 2050.



Si nous continuons à réduire la part des énergies traditionnelles et à augmenter celle des énergies renouvelables, nous pourrions utiliser 100 % d'énergies renouvelables d'ici le milieu du siècle.

Si nous y parvenons, le scénario énergétique de 2050 serait plus favorable que celui de 2030. 40 % de cette énergie proviendraient du solaire, 30 % de la biomasse, 15 % de l'éolien et 10 % de l'énergie marine. Le Président Obama a annoncé 150 milliards de dollars d'investissement dans les énergies renouvelables, qui se traduiraient par la création de 2,5 millions d'emplois. Nous aurions donc de nouvelles énergies et de nouveaux emplois.

Après les destructions de la Seconde Guerre mondiale, l'Allemagne a connu un miracle économique. À présent, nous avons la possibilité de renouer avec le miracle, écologique cette fois. Et cela ne concerne pas uniquement l'Allemagne, mais le monde entier. Mais nous ne pourrions y parvenir que si nous passons à 100 % aux énergies renouvelables. À l'avenir, nous conduirons des véhicules électriques et l'électricité

nous sera fournie par le soleil ou le vent. À long terme, nous pourrions également utiliser des voitures à hydrogène, comme nous l'avons vu tout à l'heure. L'électricité solaire nécessaire pour alimenter cette voiture est cinq fois moins chère que l'essence que nous utilisons aujourd'hui. J'ai inclus des exemples d'application du solaire en Allemagne. La première maison solaire a été construite il y a 20 ans. Elle produit trois fois plus d'électricité que les propriétaires n'en ont besoin, ce qui est bon pour l'environnement et pour le porte-monnaie. Nous avons tout à gagner de l'utilisation d'énergies alternatives.

Alors qu'attendons-nous ? Des millions de maisons dans le monde attendent le solaire. En Allemagne, nous installons de plus en plus de bâtiments autonomes. Il y a quelques années, une ancienne mine de charbon a été réaménagée en champ photovoltaïque. Plus de 8000 personnes sont alimentées en électricité par ce champ et 10 000 autres par une source similaire.

Dans mon livre *The Ecological Jesus*, je recommandais au clergé et aux théologiens d'installer des panneaux solaires sur les églises. Aujourd'hui, plus de 1000 églises allemandes sont équipées de panneaux solaires. L'énergie solaire n'est pas seulement pratique, elle peut également être esthétique. Il y a trois ans, le Vatican installait ses premiers panneaux solaires, apportant au Pape Benoît XVI l'énergie venue d'en haut. La Salle d'audience est dotée de cellules solaires qui alimentent plus de 300 personnes en électricité.

Le Bahrain World Trade Center intègre trois petites éoliennes. Une combinaison de cellules solaires couvrira l'intégralité du bâtiment, une éolienne sera installée sur le toit et l'énergie solaire produira de l'hydrogène. Ce bâtiment produira le double de l'énergie nécessaire pour les 8000 employés qui l'occuperont. Des tours à énergie de ce type sont actuellement planifiées dans trois autres pays arabes avec l'aide d'ingénieurs allemands.

Le sidérurgiste allemand mondialement connu, Thyssen Krupp Steel, a équipé ses usines de cellules solaires. Il s'agit d'un exemple d'architecture solaire esthétique. Par ailleurs, un supermarché berlinois a été le premier en Europe à produire de l'énergie sans émettre de CO<sub>2</sub>. L'énergie est issue de sources solaire et géothermique et le bâtiment est en bois.

À Mayence, un bâtiment produit plus d'énergie pour le chauffage et d'électricité que ses 250 occupants n'en ont besoin. Il s'agit de la première grande habitation solaire. Le bâtiment combine 16 petites éoliennes sur le toit, énergie photovoltaïque et géothermique. Il existe des architectures solaires esthétiques au Japon. C'est une manière de voir les choses. À Berlin, tous les ministères disposent d'installations solaires, même le bâtiment de la Chancelière Angela Merkel. L'évolution des technologies solaires nous permettra de construire un monde plus beau. Un nouveau stade de football nommé Werder Bremen a été construit en Allemagne et les cellules solaires ont été financées

par les supporters. Grâce à toutes les initiatives de ce type, nous disposons aujourd'hui de 25 % d'électricité renouvelable contre seulement 5 % en 2000, ce qui représente une multiplication par 5 sur 13 ans. Nous pouvons utiliser 100 % d'énergies renouvelables d'ici 2030 ou 2035.

Au cours des dernières décennies, les éoliennes ont bénéficié de nombreuses avancées techniques. La Chine, les États-Unis, l'Allemagne, l'Espagne, le Danemark et l'Inde sont aujourd'hui les leaders mondiaux de l'éolien. Nous passons à présent à l'offshore, qui nous permettra de produire davantage d'énergie. Les éoliennes offshore facilitent le stockage de l'énergie. À l'avenir, pour stocker l'électricité, nous devons combiner les six énergies renouvelables.

Ces énergies sont également une opportunité pour le marché de l'emploi. Elles ne détruisent pas d'emplois, au contraire, elles vont en créer beaucoup. Les créations d'emplois sont estimées à un million en Allemagne et cinq millions en Europe d'ici 2025. Nous allons bénéficier de nouvelles énergies, de nouveaux emplois et d'une nouvelle mobilité. Je ne crois pas que la technologie à elle seule puisse nous sauver. C'est pourquoi dans mon livre *The Ecological Jesus*, je vous invite à croire en la création. J'essaie de trouver une éthique écologique. Au bout du compte, l'éthique et la technologie devront être indissociables. Mon dernier livre consacré à la révolution énergétique a été publié en français.

## CAS DE LA FRANCE

**Jean-Louis BAL,**

*Président du Syndicat des Energies Renouvelables (SER)*

Je vais me placer sur une échelle de temps qui est de l'ordre de la dizaine d'années, sur les enjeux de court terme du développement des énergies renouvelables en France sur le réseau électrique et sur le système électrique de manière plus générale.

Je voudrais faire un commentaire sur ce qu'a dit Monsieur Vidal. Les énergies photovoltaïque et éolienne se développent très rapidement dans le monde et cela peut poser des problèmes d'approvisionnement en matières premières. Ce n'est pas avec le rythme de développement de ces énergies en France que l'on va épuiser les matières premières, je peux vous le garantir.

Quels sont les enjeux ? Je vous rappelle les objectifs qui ont été déterminés dans le Grenelle de l'environnement. Ce sont 25 gigawatts d'énergie éolienne, soit sur terre soit en mer. 5400 mégawatts de solaire photovoltaïque, c'est évidemment très modeste par rapport à l'objectif allemand qui est de 52 000 à l'horizon 2020. Néanmoins, je pense que cet objectif du solaire photovoltaïque en France devra être revu très prochainement à la hausse. C'est un changement significatif du dispositif de production d'électricité dans notre pays.

Qu'est-ce que cela implique ? Quelles sont les caractéristiques principales de ce développement ? D'abord une nouvelle localisation des lieux de production, donc de préférence sur les zones ventées en ce qui concerne l'éolien, sur les zones ensoleillées en ce qui concerne le photovoltaïque, et sur les sites offshore autorisés pour l'éolien marin.

Cela nécessite aussi de nouvelles tensions pour la production, puisque 95 % de nos capacités de production actuelles en énergies renouvelables sont sur le réseau de distribution.

Enfin, c'est un nouveau profil de production. Et à ce sujet, je voudrais dire que le bon terme à utiliser est celui d'énergies variables et non pas d'énergies intermittentes. Le terme « intermittent » laisse entendre que c'est aléatoire et que les énergies photovoltaïque et solaire ne sont pas prévisibles. Quand vous connaissez la production à l'instant  $t$ , vous pouvez prédire la production à l'instant  $t+1$ . Laissons le terme « intermittent » à ceux qui s'opposent au développement de ces énergies.

Quels sont les défis pour le réseau ? D'abord, il y a la création de nouvelles capacités d'accueil et des investissements significatifs à faire sur le réseau de transport.

RTE, le Réseau de Transport de l'Electricité, qui gère le réseau de transport français, avait évalué à l'époque (il y a deux ou trois ans) à 1 milliard d'euros le niveau d'investissement, rien que pour le développement de l'éolien onshore. Si l'on veut renforcer ce réseau, cela nécessitera de la coordination entre les développeurs de production éolienne et les services chargés d'investir dans le développement du réseau de transport.

A cette fin, la loi Grenelle II a institué ce que l'on appelle les schémas régionaux de raccordement au réseau des énergies renouvelables, qui vont anticiper le développement du réseau en fonction des lieux prévus pour implanter à la fois l'éolien et le solaire. Ces schémas vont avoir pour objectif de mutualiser les coûts de développement de ces réseaux au niveau régional.

Pour le réseau de distribution, les enjeux sont également importants, et notamment parce que la plupart des installations sont connectées sur le réseau de distribution à des tensions inférieures à 20 kilovolts.

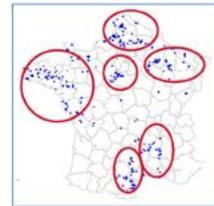
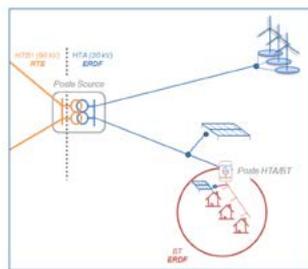
Ces réseaux ont été initialement conçus pour distribuer l'énergie venant des grandes centrales.

Il y a donc un nouveau rôle pour ces réseaux. Cela nécessite une évolution pour faciliter la connexion des énergies renouvelables. Cela nécessite donc une optimisation, qui peut également permettre l'utilisation des nouvelles caractéristiques pour renforcer les réseaux. Il y a également des effets positifs, notamment par le fait que l'on peut injecter ou absorber de l'énergie réactive à partir des installations photovoltaïques.

dans un premier temps, et dans les prochains mois également pour le photovoltaïque. C'est ce qui permet d'ajuster les moyens de production complémentaires aux variations des énergies solaire et éolienne.

Concernant la variabilité, nous avons un laboratoire idéal avec les départements d'outre-mer et la Corse. On en a déjà eu une illustration tout à l'heure avec la centrale Myrte. On a déjà dans ces territoires, atteint des taux de pénétration en puissance instantanée supérieurs à 30 %, ce qui est par arrêté réglementaire le maximum autorisé.

1. **New localization** : windy, sunny regions ; permitted offshore sites...



2. **New voltage levels** : 95 % RES capacities connected to distribution grids

3. **New production profiles** : varies according to the resource



Quels sont les enjeux liés à la variabilité de ces énergies ? Je dois d'abord faire un commentaire. Cette variabilité existe déjà fortement sur le réseau. Donc on va avoir à intégrer plusieurs dizaines de gigawatts de nouvelles capacités, donc de capacités variables, mais cette variabilité est déjà bien connue, d'abord par la demande de consommation d'énergie qui varie elle-même de façon journalière, hebdomadaire ou saisonnière. On peut, par exemple sur le réseau français, avoir au niveau de la demande, 20 gigawatts de différence entre le jour et la nuit.

On a également des événements tels que des défaillances de centrales. Si une centrale nucléaire s'arrête aujourd'hui – et cela peut arriver de manière imprévisible – ce sont 1500 mégawatts qui disparaissent instantanément du réseau.

Une autre variabilité possible est celle des erreurs de prédiction sur les conditions atmosphériques, sur les conditions de température. Un degré de variation en hiver induit 2300 mégawatts de variation sur les besoins.

Aujourd'hui, avec le taux de pénétration que nous avons de ces énergies variables, la question la plus importante est celle de pouvoir prédire et observer ces productions. Et c'est à cette fin que RTE a mis au point un système de prévisions que vous pouvez d'ailleurs suivre sur le site web de RTE, pour l'éolien

Pour pouvoir aller plus loin dans le développement des renouvelables sur ces territoires, il faut s'attaquer aux questions du stockage et des réseaux intelligents.

Le dernier point sur l'intégration des renouvelables sur le réseau, est celui des codes réseaux pour lesquels la réglementation européenne doit définir les caractéristiques des renouvelables connectées à ces réseaux, comment elles doivent se comporter en cas d'incident.

Je vous citerai par exemple le black-out que nous avons connu en novembre 2006 au niveau européen. On a accusé les énergies renouvelables, et particulièrement l'éolien, d'être à l'origine du black-out. S'il est vrai que les centrales éoliennes, obéissant aux automatismes dictés par les exploitants de réseaux, se sont déconnectées et ont amplifié le black-out, elles n'étaient en rien à l'origine de tout cela.

Autre exemple possible. Vous savez que les centrales photovoltaïques sont programmées pour se déconnecter dès que la fréquence atteint 50,2 hertz. Si toutes les centrales photovoltaïques se déconnectent en même temps, il y aura de gros problèmes sur le réseau.

Tous ces codes réseaux doivent être adaptés au développement des énergies renouvelables, et aussi en amont que possible.

## SESSION III

## Comment favoriser les conditions du déploiement futur des énergies renouvelables pour un accès universel à l'énergie ?

Présidente de session

**Dominique CAMPANA**

Directrice de l'Action internationale de l'ADEME

L'accès à l'énergie durable pour tous reste un défi à relever, tant en termes de développement que de protection de l'environnement. Aujourd'hui, un cinquième de la population mondiale, soit 1,3 milliard de personnes, n'a toujours pas accès à l'électricité et 2,7 milliards de personnes, dépendent de la biomasse traditionnelle pour la cuisson et le chauffage. Certains pays sont particulièrement concernés, comme en Afrique subsaharienne où ces problématiques touchent directement entre 580 et 650 millions de personnes, soit environ 70 % de la population, dont 80 % en zone rurale.

Cependant, au-delà de ces chiffres globaux, des progrès se réalisent à différents niveaux. Par exemple, plus de 138 pays ont mis en place des objectifs et politiques pour promouvoir les énergies renouvelables, dont les deux-tiers sont des pays en développement.

Au niveau mondial, afin d'apporter un soutien politique de haut niveau en faveur de l'accès à l'énergie le Secrétaire général de l'ONU a lancé en septembre 2011, l'initiative Énergie durable pour tous (SE4All). Projet conçu pour soutenir trois objectifs majeurs d'ici à 2030 : l'accès universel à l'énergie, le doublement du taux mondial d'efficacité énergétique et le doublement des énergies renouvelables utilisées dans le monde.

Dans ce cadre, différents programmes sont menés afin d'assurer transferts de savoir-faire et mobilisation des investissements pour un déploiement renforcé des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique dans les pays en développement, qui seront présentés au cours de cette session :

- En Méditerranée, le Plan Solaire Méditerranéen (PSM), projet de l'Union pour la Méditerranée (UpM), a été lancé en juillet 2008. Son double objectif est d'accroître la production d'électricité renouvelable de 20 GW à l'horizon 2020 et de promouvoir l'efficacité énergétique. L'Observatoire méditerranéen de l'énergie (OME) et MEDENER (association méditerranéenne qui regroupe 12 agences nationales de maîtrise de l'énergie) sont parmi les acteurs de la transition énergétique en Méditerranée qui relaient ces objectifs.
- En Afrique de l'ouest le Centre Régional pour les Energies Renouvelables et l'Efficacité Énergétique (ECREEE) est la première agence régionale

dédiée à la promotion de ces thématiques en Afrique subsaharienne. Elle apporte un soutien aux quinze États Membres de la Communauté des États d'Afrique de l'Ouest (CEDEAO), pour le développement, l'adoption et la mise en œuvre de leurs politiques nationales en matière d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique.

- Au niveau multilatéral, de nombreux programmes sont mis en œuvre par différents organismes dont les agences des Nations Unies. Par exemple, le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) accompagne les pays en développement afin de faciliter le développement des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique, le renforcement de compétences et l'accès au financement.
- La question des financements reste essentielle. En effet, au niveau mondial, les investissements dans les énergies renouvelables ont été multipliés par 6.5 entre 2004 et 2011, mais moins de 7 % de cette croissance a profité aux pays en développement. Citigroup (groupe bancaire américain) et l'Agence Française de Développement illustreront l'implication des institutions financières et des banques de développement pour favoriser les investissements qui permettront l'accès universel à l'énergie.



Captteur solaire installé en haut d'un mât dans le village de Towé au Bénin

Crédit photo © Michel Courillon/ADEME

## EXPÉRIENCE DU PNUE DANS LE DÉPLOIEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES ET DES TECHNOLOGIES SOBRES EN CARBONE DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

**Dr Zitouni OULD-DADA**

*Directeur de l'Unité Technologie, Branche Énergie de la Division Technologie, Industrie et Economie (DTIE) du PNUE.*

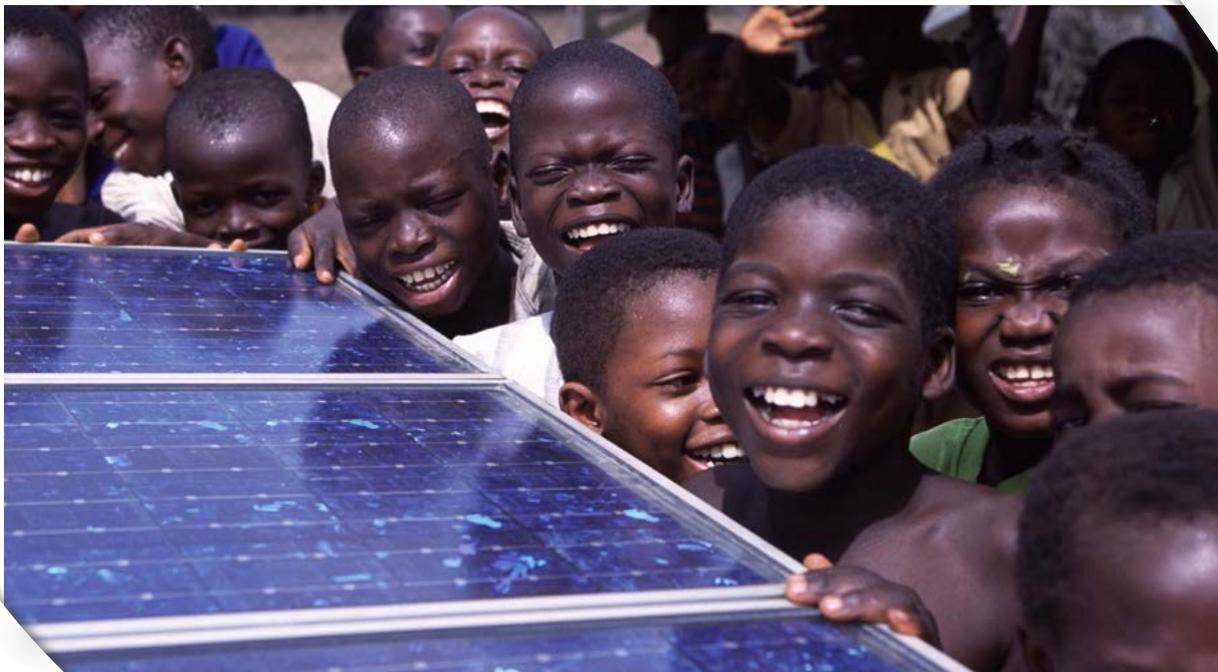
Je vous remercie de m'avoir invité à cette conférence et je suis ravi d'être présent parmi vous. Aujourd'hui, je vais aborder trois points principaux : un tour d'horizon des politiques de développement de technologies sobres en carbone dans le monde, les conditions nécessaires à l'adoption de ces technologies et la transition vers les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique. Bien que nous parlions d'énergies renouvelables, l'efficacité énergétique reste tout aussi importante.

Outre la problématique de la sécurité énergétique, les changements climatiques, la croissance de la population, les questions de sécurité alimentaire et de sécurité de l'eau menacent le développement économique et social des populations. Les technologies propres peuvent contribuer à apporter des solutions à ces défis mondiaux.

pays ont mis en place des politiques pour promouvoir les énergies renouvelables. Environ 140 pays ont désormais des objectifs dans ce domaine et le nombre de politiques a doublé entre 2005 et 2012. De plus en plus de villes et d'autorités locales instaurent également des politiques.

Le PNUE soutient très activement les pays en développement dans la transition vers des technologies résilientes et sobres en carbone. Nous aidons ces pays à créer un environnement favorable à l'instauration de politiques appropriées et à renforcer leurs capacités dans les domaines des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique.

Laissez-moi vous présenter deux exemples. Tout d'abord, nous aidons six pays africains à explorer leurs ressources géothermiques : le Rwanda, l'Ouganda, le Kenya, l'Éthiopie, la Tanzanie et l'Érythrée.



Crédit Photo©: Daniel Riffet / ADBME

Electrification des sites isolés en Afrique

Afin de satisfaire aux besoins énergétiques de façon sûre, abordable et durable, une révolution technologique et des investissements massifs sont nécessaires, mais nous disposons déjà des technologies qui pourraient nous conduire à un futur énergétique durable.

A l'échelle mondiale, le contexte politique est très encourageant. En effet, comme ma collègue de REN21 Christine Lins vous l'a indiqué ce matin, de nombreux

Dans le cas du Kenya, la ressource géothermique pourrait permettre de produire un tiers de la production d'énergie au cours des 20 prochaines années. D'autre part, nous travaillons actuellement en collaboration avec le PNUD pour appuyer cinq pays (l'Albanie, le Chili, l'Inde, le Mexique et le Liban) dans la promotion, l'adoption et la diffusion de systèmes de chauffe-eau solaire.

Par ailleurs, nous appuyons les pays en développement à mettre en place des politiques et des réglementations destinées à faciliter le développement et le déploiement d'énergies renouvelables. Cela passe par la création d'un environnement favorable, ce qui inclut le renforcement des capacités, le développement de politiques et l'accès au financement. Le transfert de compétences et de savoir-faire techniques, est en effet essentiel pour garantir une utilisation et une gestion efficaces des technologies. On peut également souligner le rôle des projets de démonstration qui permettent d'évaluer la pertinence technique, économique et environnementale des technologies en concertation avec les bénéficiaires.

Comme je vous le disais en introduction, énergie renouvelable et efficacité énergétique vont de pair. L'efficacité énergétique représente des opportunités de rendement immédiat. Ce concept n'implique pas uniquement l'introduction de technologies plus performantes. En effet, l'évolution du comportement des consommateurs peut également permettre de réaliser des économies d'énergie.

L'une des approches les plus efficaces du PNUE consiste à mener des projets pilotes dans des pays en développement. Nous pouvons ainsi tester les projets, tirer des leçons de cette expérience, et si le résultat est satisfaisant, nous pouvons reproduire et adapter le projet dans d'autres régions. Cette approche a notamment donné naissance à l'initiative En.lighten. Cette initiative appuie différents pays pour l'élaboration de politiques, de stratégies et d'actions qui permettront le remplacement des dispositifs d'éclairage inefficaces et l'arrivée sur le marché de solutions technologiques plus innovantes et plus économes en énergie.

Pour le moment, En.lighten regroupe 50 pays et nous poursuivons nos efforts pour en rallier de nouveaux. À mesure que nous démontrons son utilité, cette initiative suscite de plus en plus d'intérêt.

Nos activités s'inscrivent dans la lignée de l'initiative Énergie durable pour tous qui a été lancée en 2011 par le Secrétaire général des Nations Unies Ban Ki-moon. L'initiative s'appuie sur 6 centres régionaux et thématiques, tels que : le centre efficacité énergétique installé à Copenhague et dirigé par le PNUE et le centre énergie renouvelable dirigé par l'IRENA, qui œuvrent pour la promotion et l'accélération du déploiement des énergies renouvelables. Copenhague accueillera également le Centre et Réseau des Technologies sur le Climat (CTCN en anglais), établi au titre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC). Le CTCN aidera les pays en développement à se doter de technologies sobres en carbone, ainsi que des connaissances et du savoir-faire nécessaires. Il sera chargé de stimuler la coopération en matière de transfert de technologie dans les pays en développement.

Pour conclure, j'aimerais revenir sur les quelques messages clés. Tout d'abord, les technologies qui nous permettront d'effectuer une transition vers des technologies durables et sobres en carbone sont déjà disponibles. Elles doivent simplement être adaptées et améliorées dans certains cas. Cela nécessitera toutefois des investissements massifs dans la recherche et l'innovation. Ensuite, il est indispensable de créer un environnement favorable pour diffuser et déployer efficacement ces technologies. Enfin, nous devons tirer des leçons de nos expériences et reproduire les initiatives positives. Pour conclure, je dirais que l'efficacité énergétique présente un énorme potentiel qui reste largement sous-exploité.

## LE PROGRAMME RÉGIONAL DU CENTRE POUR LES ENERGIES RENOUVELABLES ET L'EFFICACITÉ ENERGÉTIQUE DE LA CEDEAO

### Mahama KAPPIAH

*Directeur exécutif du Centre pour les Energies Renouvelables et l'Efficacité Énergétique (ECREEE) de la CEDEAO*

L'Afrique de l'Ouest comprend 15 pays et représente 300 millions de personnes dont 60 % vivent en zone rurale. 80 % de la population n'a pas accès aux services énergétiques modernes. De nombreuses personnes utilisent encore la biomasse traditionnelle (bois, charbon de bois...) pour satisfaire leurs besoins en éclairage, en cuisine et en chauffage.

L'accès aux services d'énergie modernes reste très limité. Le taux d'utilisation de ces services dans la région compte parmi les plus faibles au monde. Les habitants des zones rurales utilisent principalement la

biomasse traditionnelle et seuls 20 % des ménages ont accès à l'électricité (40 % en zones urbaines).

Nous avons accès à des ressources énergétiques renouvelables considérables que nous pourrions exploiter, mais nous ne disposons pas de ressources fossiles. Hormis le Nigeria, aucun pays ne dispose de suffisamment de ressources fossiles. Toutefois, nous disposons de ressources hydroélectriques importantes et d'un potentiel bioénergétique exceptionnel. Des systèmes à énergie solaire photovoltaïque et thermique pourraient également être mis en place.

Certaines régions présentent par ailleurs un potentiel éolien. Le potentiel d'efficacité énergétique ne doit pas non plus être sous-estimé. Il reste très important et nous y reviendrons. Pourquoi ces ressources sont-elles sous exploitées ? Une combinaison de facteurs limite le développement des énergies renouvelables, parmi lesquels : les obstacles politiques (un cadre institutionnel et des infrastructures déficientes, etc.), les obstacles financiers (absence de financement à long terme et peu coûteux), les obstacles techniques (manque de main-d'œuvre qualifiée). Ces dernières années aucun pays ne disposait de politiques bien définies dédiées à la promotion des énergies renouvelables. Les coûts d'investissements initiaux élevés liés au montage de projets d'énergies renouvelables et le manque de compétences techniques ont également constitué un frein important à l'essor de ces technologies en Afrique de l'Ouest.

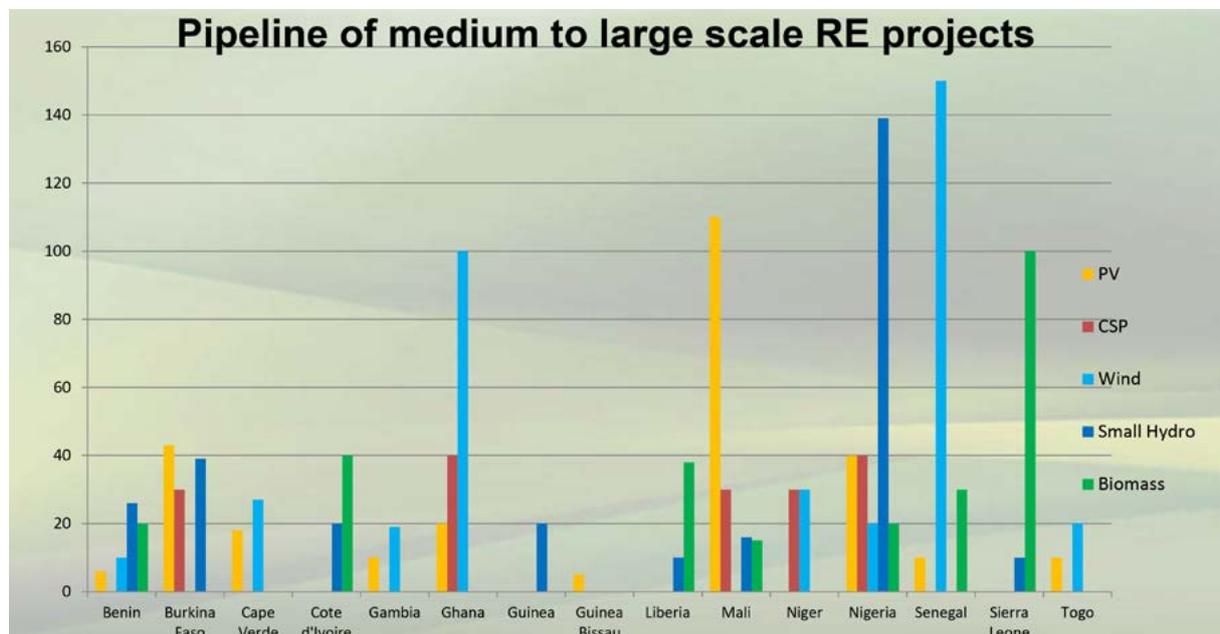
Après une période 2008-2009 chaotique pendant laquelle les coupures de courant se sont enchaînées, la CEDEAO a créé en 2010 le Centre pour les Energies Renouvelables et l'Efficacité Énergétique (ECREEE) avec le soutien de l'Autriche, de l'Espagne et de l'ONU. Quelles ont été nos actions ? Le centre se consacre à la promotion des énergies renouvelables. L'objectif est de créer un environnement favorable aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique. Cela signifie renforcer les capacités, partager les connaissances, soutenir le développement de politiques et promouvoir les investissements.

décidées sur une période très courte. Aucune autre politique n'a été adoptée aussi promptement au sein de la CEDEAO. Cette rapidité montre la volonté de nos chefs d'État de se lancer sur cette nouvelle voie de développement.

En matière d'énergies renouvelables, les objectifs suivants ont été définis : un objectif de 10 % d'énergies renouvelables en 2020 (hors grande hydroélectricité) et 19 % en 2030. Nous avons également créé un objectif spécifique pour les communautés rurales, la part de la population en zone rurale desservie par des mini-réseaux et systèmes autonomes alimentés par les sources renouvelables se situant actuellement à un niveau inférieur à 1 pour cent. Cette part devrait passer à 22 % à l'horizon 2020 et à 25 % à l'horizon 2030. En termes d'efficacité énergétique, des mesures qui devraient libérer 2000 MW de capacité de production d'électricité (plus du double du taux d'amélioration annuelle de l'efficacité énergétique) seront mises en œuvre.

Ces chiffres peuvent paraître modestes. Les décideurs ont en effet préféré rester prudents et fixer des objectifs réalistes et à notre portée. Si nous les atteignons dans 5 ans, nous pourrions alors fixer de nouveaux objectifs plus ambitieux.

Quels sont les facteurs favorables ? Tout d'abord, des politiques nationales et des objectifs en matière d'énergies renouvelables sont déjà en cours d'élaboration. Par exemple, le Cap-Vert vise 50 % d'énergies renouvelables d'ici 2020.



Portefeuille de projets énergies renouvelables de moyenne et grande échelle

Nous avons ainsi apporté notre soutien aux quinze États membres de la CEDEAO, en lien étroit avec les ministères de l'énergie, pour l'adoption de leurs politiques nationales en matière d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. Cette année, les chefs d'État de la CEDEAO ont adopté des politiques régionales pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique. Ces politiques ont été

Cette politique a été adoptée en 2008. En 2012, le pays avait déjà atteint 25 % d'énergies renouvelables et pourra donc atteindre son objectif de 50 % en 2020. Des études sont actuellement en cours pour déterminer s'il est possible d'atteindre 100 % en 2030.

Différents pays suivent cet exemple. Le Ghana vient d'adopter une politique fixant un objectif de 10 %. Cet objectif est de 15 % au Sénégal, 20 % au Liberia et 15 % au Mali. Je considère qu'il s'agit d'un facteur favorable. Il y a également des politiques incitatives : des tarifs d'achat sont mis en place dans la plupart des pays de la région, ce qui montre qu'ils sont prêts à soutenir la croissance des énergies renouvelables.

Diverses ressources interagissent fortement avec les infrastructures existantes, notamment les centrales électriques, les lignes de transport d'électricité, les centres urbains et les réseaux routiers. Lorsque vous identifiez des zones dans lesquelles le développement d'une énergie renouvelable vous semble possible, vous pouvez vous appuyer sur l'infrastructure existante qui peut fortement contribuer au projet.

Nous organisons des forums d'investissement. Le prochain se déroulera d'ailleurs la semaine prochaine. Vous serez surpris d'apprendre qu'après l'adoption de ces politiques par les chefs d'État, le nombre de participants au forum de cette année a fortement augmenté. De nombreuses personnes ont manifesté leur intérêt et constatent que nous bénéficions d'un soutien politique de haut niveau. Nous travaillons également sur le plan technique. Les choses évoluent à la fois sur le plan des énergies renouvelables et sur le plan de l'efficacité énergétique.

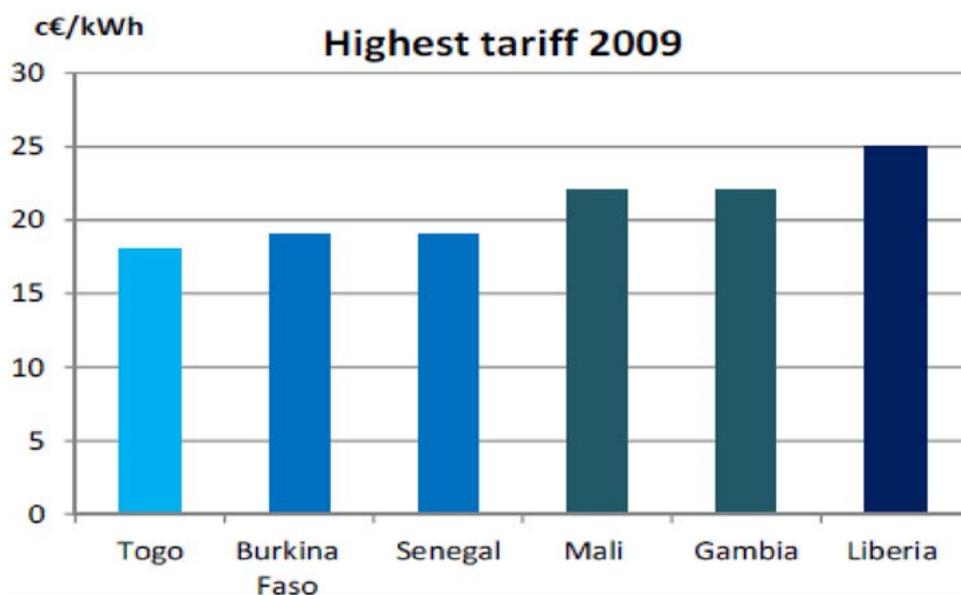
L'intervenant précédent a mentionné le programme En.lighten. Tous les pays membres de la CEDEAO participent à ce programme. Maintenant que notre politique d'efficacité énergétique a été adoptée, nous travaillons avec le PNUE à la mise en œuvre des activités du programme. Nous déployons tous les efforts nécessaires pour atteindre nos objectifs d'efficacité énergétique. Nous espérons éliminer les ampoules à incandescences au profit d'ampoules plus économes pour 2016. Il ne nous reste plus que 2-3 ans et nous mettons donc tout en œuvre pour y arriver.

Sur le plan des investissements, nous avons déjà pu réaliser des projets d'investissements concernant différentes technologies : bioénergie, éolien, solaire photovoltaïque et solaire thermique. Chaque pays lance ses propres actions et propose de nouvelles idées. Certaines se sont déjà concrétisées notamment : l'installation de panneaux solaires photovoltaïque d'une puissance de 7,5 MW en 2010 au Cap-Vert ; En 2011, le Ghana a installé une centrale solaire photovoltaïque d'une capacité de production électrique de 2,5 MW ; Le Cap-Vert a également mis en service un parc éolien d'une capacité de 24 MW et développe aujourd'hui de nombreux autres projets éoliens et solaires photovoltaïques. Le pays cherche ainsi à tenir son objectif de 50 % d'énergies renouvelables à l'horizon 2020.

Le Cap-Vert est devenu le leader des énergies renouvelables de la région, et les autres pays suivent son exemple. Le Burkina Faso travaille sur une ferme éolienne de 14 MW, qui sera bientôt finalisée. Le Sénégal vise une capacité de 113 MW, etc. D'autres pays ont des objectifs plus modestes, mais tous agissent et montrent que nous devons nous engager sur le chemin d'une énergie plus verte.

Des solutions hors réseau peuvent également être mises en place dans les communautés rurales. Des systèmes sur toit sont installés dans plusieurs zones de la région. C'est une véritable nouveauté. L'intérêt pour ce type de solution augmente, principalement parce que leur prix diminue, ce qui améliore considérablement leur rentabilité. La technologie est plus mature et donc plus attrayante.

Il est intéressant de noter que les tarifs de l'électricité sont plutôt élevés dans la région. Pour le consommateur, ils s'élèvent à 13,6 centimes du kilowatt-heure en moyenne.



**Sources: ECOWAS RE policy baseline report 2012**

Les tarifs d'électricité en 2009

Au Cap-Vert, ce tarif se monte à 28 centimes d'euro par kilowatt-heure. Le Ghana a quant à lui augmenté le tarif de l'électricité de 78 % la semaine dernière, ce qui représente plus de 18 centimes par kilowatt-heure. Avec de tels tarifs, il existe certainement un type d'énergie renouvelable adapté à la situation. Vous n'avez même pas besoin d'un tarif d'achat pour vous faire une place sur le marché.

La promotion des investissements monte en puissance. De plus, l'adoption des politiques régionales en matière d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables nous a mis en position de force. Nous sommes

convaincus que les objectifs définis dans ces politiques seront atteints bien plus rapidement que prévu.

Nous n'aurions pas pu réaliser tout cela sans le soutien de nos partenaires, en particulier l'ADEME et son appui pour la mise en œuvre du programme d'efficacité énergétique. Je tiens donc à les remercier vivement. De nombreux autres organismes nous soutiennent, comme le ministère français des Affaires étrangères. Il y a aussi les différents acteurs financiers. De nombreuses banques de développement suivent nos activités et sont réellement intéressées par nos actions.

## LES PERSPECTIVES DES ÉNERGIES RENOUVELABLES DANS LES PAYS MÉDITERRANÉENS

**Houda ALLAL**

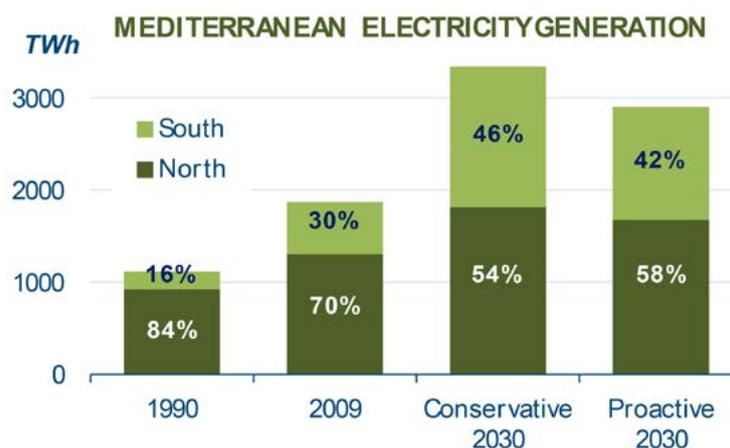
*Directrice générale de l'Observatoire Méditerranéen de l'Énergie (OME)*

Je vais vous parler brièvement des perspectives des énergies renouvelables en Méditerranée, avec quelques mots sur le Plan Solaire Méditerranéen, programme sur lequel plusieurs acteurs de la région ont beaucoup d'attentes et d'espoir pour booster de manière efficace les énergies renouvelables en Méditerranée.

L'OME est une association qui regroupe des opérateurs énergétiques. Elle existe depuis 25 ans et travaille main dans la main avec MEDENER depuis de nombreuses années. Parmi nos principales activités, figure l'analyse des perspectives énergétiques, toutes énergies confondues, dans la région méditerranéenne. Pour l'OME, la Méditerranée regroupe l'ensemble des pays du pourtour méditerranéen du Maroc jusqu'au Portugal.

En termes d'énergie, la Méditerranée est globalement une région connue pour sa forte interdépendance et sa complémentarité. Les ressources sont inégalement distribuées dans la région. La région ne dispose pas suffisamment de ressources en hydrocarbures pour subvenir à ses besoins. Quand on regarde les perspectives, la situation ne s'améliore pas, bien au contraire comme nous verrons un peu plus tard. Nos scénarios vont jusqu'à l'horizon 2030.

La région fait donc face à des défis majeurs en termes de sécurité d'approvisionnement pour tous. Mais elle est également pointée du doigt en termes de changement climatique. Les travaux du GIEC ont en effet toujours pointé la Méditerranée comme une des régions les plus vulnérables. Bien évidemment, là aussi, un système énergétique basé essentiellement sur les hydrocarbures pose un problème du point de vue du changement climatique.



**Electricity demand in the South will nearly triple by 2030.**

*La production d'électricité en méditerranée*

En plus de cela, vous connaissez les bouleversements que connaît notre région tant au Nord qu'au Sud. La crise au Nord n'est pas encore terminée et s'avère peut être un peu artificiellement bénéfique à l'énergie, du fait de la stagnation voire de la baisse de la demande. Dans les pays du Sud, les changements qui s'opèrent aujourd'hui et les bouleversements mettent un accent encore un peu plus fort sur l'énergie, comme réponse aux aspirations des populations d'une amélioration du niveau de vie, mais également de plus d'emplois.

Il y a donc une forte pression dans un monde qui doit faire face notamment à une croissance économique et une croissance démographique soutenues. Quand on regarde du côté des perspectives, notre scénario « business as usual » (laisser-faire), n'est pas un scénario « noir ». Il intègre en effet un effort significatif sur l'efficacité énergétique et le développement des énergies renouvelables dans la région, mais de manière réaliste et prudente, compte tenu du fait que les conditions actuellement en vigueur ne satisfont pas une réalisation à la hauteur des objectifs ambitieux annoncés par la plupart des pays. En particulier, dans les pays du Sud, les objectifs sont ambitieux mais non contraints. Nous sommes donc assez prudents, mais tout en étant optimiste.

Pour autant, si on laisse faire, à l'horizon 2030 il va y avoir, pour faire simple, dans les pays du Sud (du Maroc jusqu'à la Turquie) un doublement de la demande d'énergies primaires et un triplement de la demande d'électricité. C'est énorme.

D'un autre côté, la région dispose d'un potentiel formidable d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique, et cela fait plus de 20 ans que ces pays essaient de développer ces ressources. Ils ont la volonté, ils essaient. Il y a des projets solaires et éoliens un peu partout, mais force est de constater que leur concrétisation est aujourd'hui bien en dessous de ce qu'elle pourrait être.

Le challenge pour la Méditerranée, est essentiellement dans le sud. Au Nord, la population se stabiliserait d'ici 2030, mais au sud elle devrait augmenter de 80 millions. Il faudra donc plus de logements, plus d'emplois et une meilleure qualité de vie, mais il n'y a pas suffisamment d'énergie disponible et les émissions de CO<sub>2</sub> vont doubler si on laisse faire, ce qui est inacceptable du point de vue du développement durable.

Nous avons travaillé sur un premier scénario alternatif dans lequel on a boosté les énergies renouvelables, parce qu'il y a un potentiel formidable, et des signaux de la part des pays de vouloir exploiter ce potentiel et surtout l'efficacité énergétique.

On est capable de réduire la tension sur la sécurité des approvisionnements, donc le scénario business as usual n'est pas une fatalité. On peut développer de manière un peu plus intelligente les renouvelables, qui pourraient avoir une part dans la demande d'énergie qui doublerait par rapport à aujourd'hui, en passant de 8 à 16 %. Le secteur qui dérape le plus est le secteur électrique. Je le disais tout à l'heure, il y aura un triplement de la

consommation d'électricité dans les pays du Sud d'ici à 2030, il s'agit donc de demain. Je suis entre le court terme et le moyen terme.

Si l'on compare la répartition de la production d'électricité entre le Nord et le Sud, on voit que le Sud prend aussi le pas. Dans les années 90, il ne représentait que 16 %, et en 2030 ce sera pratiquement équilibré entre le Nord et le Sud. Donc, une demande d'électricité qui triple, cela veut dire quoi ? Dans les pays du Sud, d'ici à 2030, on va construire environ 200 gigawatts de centrales électriques pour satisfaire ces besoins.

Selon les décisions qui vont être prises aujourd'hui, le mix électrique sera de telle ou telle couleur. Mais quel que soit le scénario, les hydrocarbures vont continuer à jouer un rôle important dans notre région. Cela, est un fait.

Concernant le gaz naturel, la région rentre dans une ère de gaz naturel, mais les énergies renouvelables pourront jouer un rôle vraiment très important. La grande hydraulique a été largement exploitée, mais les autres énergies renouvelables et en particulier l'énergie solaire et l'énergie éolienne, pourront jouer un rôle significatif. Avec plus d'efficacité énergétique et plus de renouvelables, on peut même économiser 32 gigawatts d'ici 2030. Mais les décisions doivent être prises aujourd'hui.

Il y a beaucoup d'espoir, beaucoup d'attentes sur le Plan Solaire Méditerranéen, qui a été lancé lors d'un sommet en 2008 par l'Union pour la Méditerranée. Nous étions tous déçus par le processus de Barcelone. Il fallait faire quelque chose qui booste la coopération régionale parce que tout le monde y croyait. L'Union pour la Méditerranée se voulait être la relance du processus de Barcelone.

Dans le domaine de l'énergie, l'idée était de commencer par une coopération régionale, par des projets. Voilà un beau sujet sur lequel on pouvait coopérer, le solaire, puisque les énergies renouvelables sont abondantes dans la région et qu'il y avait un intérêt Nord/Sud à coopérer.

Le premier objectif du Plan Solaire Méditerranéen est d'atteindre une capacité installée de 20 gigawatts à l'horizon 2020. Ce n'est pas utopique, vu que la Turquie fait partie des pays cibles, et que la Turquie à elle seule peut atteindre les objectifs du Plan Solaire Méditerranéen.

Ce n'est donc pas utopique, et d'ailleurs même les scénarios « laisser-faire » de l'OME montrent que c'est possible et faisable si l'on met en place les actions nécessaires.

On peut se demander ce qu'il s'est passé depuis 2008. La bonne nouvelle est qu'avec le Plan Solaire Méditerranéen, il s'est passé beaucoup de choses. On est en 2013 et on n'a pas encore vraiment lancé de gros projets. Par contre, un travail formidable a été réalisé, un Master Plan a été élaboré.

On est main dans la main avec les organisations régionales, pour pousser les ministres qui vont se réunir le 11 décembre à Bruxelles, pour lancer le Master Plan et lui donner les moyens, pour que ce soit concret.

On est en train de pousser et on espère entrer dans une phase de mise en place. J'espère que l'efficacité énergétique trouvera également sa place parce que c'est très important. Pour nous, il faudrait commencer par là.

Le Master Plan et le Plan Solaire Méditerranéen ont été des catalyseurs. Ils ont donné un coup de fouet aux renouvelables dans la région.

Plusieurs pays ont déjà commencé à travailler et lancé des plans nationaux d'énergies renouvelables. Par exemple, au Maroc, on n'en est pas aux chiffres allemands, mais un plan ambitieux a déjà démarré avec comme objectif l'installation de 2 gigawatts de solaire d'ici 2020 et des objectifs pour 2030 sont en cours de définition. De plus, 2 gigawatts en 2020 pour l'éolien et le photovoltaïque connecté sont également prévus. La Tunisie s'est également dotée d'un premier Plan Solaire qu'elle est en train de réviser.

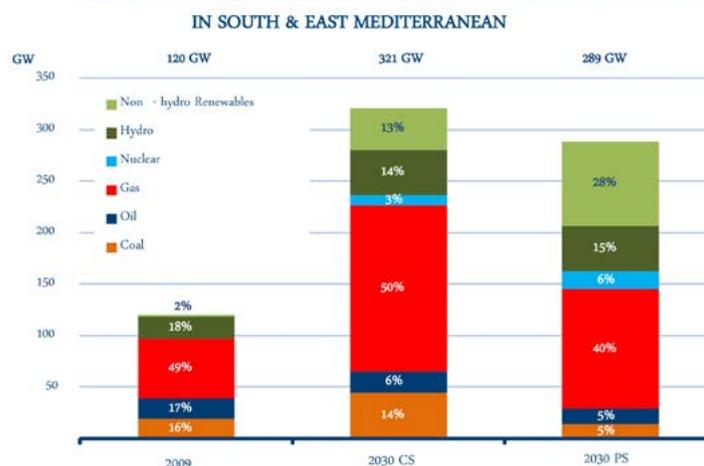
Aujourd'hui tout le monde parle de transition énergétique. Les pays sont pour la plupart en train de

lancer des chantiers incroyables dans le domaine de l'énergie. Pourquoi ? Parce qu'ils n'ont pas le choix de toute façon, cela s'impose. Comme je le disais, il n'y a pas suffisamment de ressources pour tout le monde, il y a beaucoup de défis et beaucoup de pressions.

Pour résumer, la volonté pour aller de l'avant dans le domaine des renouvelables et de l'efficacité énergétique est là, mais pour autant et pour l'instant, les conditions idéales ne sont pas réunies. C'est pour cela que le Plan Solaire Méditerranéen est important et que les gouvernements ont un rôle à jouer pour mettre en place les cadres institutionnels adéquats. Les prix de l'électricité posent également problème dans les pays du Sud, où ils sont souvent fortement subventionnés. Il y a donc un certain nombre d'obstacles qui font que l'on n'atteint pas aujourd'hui les niveaux que l'on souhaite en termes de développement des renouvelables et de l'efficacité énergétique.

Pour finir, les énergies renouvelables ont un potentiel considérable en Méditerranée. Elles ont leur place. On n'a pas d'autre choix que de les développer. Pour l'instant, la Méditerranée ne constitue pas vraiment un marché et chaque pays essaie de se développer tout seul, mais il y a une volonté d'aller de l'avant.

## ADDITIONAL GENERATION CAPACITY NEEDED



**200 GW will be required to meet electricity demand.  
32 GW less in a Proactive Scenario.**

## LES MÉCANISMES DE FINANCEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

**Michael ECKHART**

Directeur Général, Citigroup, États-Unis

C'est un grand plaisir et un honneur d'être parmi vous aujourd'hui. Je suis le fondateur du Conseil américain de l'énergie renouvelable (American Council on Renewable Energy). Je le dois à Hermann Scheer, fondateur du Conseil mondial des énergies renouvelables. Je faisais partie de la dizaine

de candidats qu'il avait sélectionnés. Le mérite lui revient donc, ainsi qu'à Wolfgang Palz.

Au cours de mon intervention, je vais faire référence à un point dont Harry Lehmann et moi-même avons discuté il y a quelques années déjà.

Lors des mes premières années de carrière à General Electric et dans d'autres sociétés, la Terre était toujours représentée par la même photographie. J'ai toujours été déconcerté par l'environnement, le climat et la façon dont nous pouvions agir.

En 1995, j'ai découvert une photographie qui m'a beaucoup choqué, et que je présente depuis à chacune des conférences dans lesquelles j'interviens. J'ai réalisé à quel point l'atmosphère était fine. Nous nous en rendons tous compte lorsque nous prenons l'avion, mais cette photo met vraiment en avant la fragilité de notre environnement.



Elle m'a transformé et m'a décidé à travailler sur ce sujet. Depuis 1995, je travaille exclusivement sur l'énergie solaire et les énergies renouvelables.

Je tiens toutefois à mentionner que j'ai travaillé sur ces mêmes sujets par intermittence entre 1973 et 1995. Ma première participation à un projet dans ce domaine remonte à 1976. J'ai réalisé la première étude nationale sur le photovoltaïque solaire pour l'administration Carter en 1978. Mes prévisions se sont révélées plutôt correctes.

Je me suis intéressé à ces technologies tout au long de ma carrière et j'ai même participé d'une certaine manière à leur développement.

Elles ont pu voir le jour grâce à une collaboration internationale pour la recherche et le développement, une grande inventivité, une forte motivation, le goût de l'entrepreneuriat, des soutiens gouvernementaux, des financements et des décisions intelligentes. Tout n'était pas parfait, mais globalement, cela a constitué un progrès technologique international exceptionnel. Contrairement à de nombreuses inventions, celle-ci n'est en rien accidentelle. Elle a été voulue, et je tiens à dire que c'est un grand succès.

Nous avons poursuivi nos efforts, et la commercialisation des technologies a débuté aux alentours de l'année 2000. Comme l'a indiqué Wolfgang, les tarifs d'achat définis en 2004 ont été le moteur des politiques et des financements. Les investissements dans les énergies vertes s'établissent aujourd'hui autour de 250 milliards par an.

Tout cela a été favorisé par les politiques publiques mais aussi, par les taux d'intérêt bas, par les investisseurs motivés et par la baisse des prix des technologies. Le marché et la demande ont été créés par les politiques gouvernementales. J'aimerais préciser un point concernant les tarifs d'achat. J'ai mentionné Harry Lehmann tout à l'heure, car nous avons travaillé sur ce sujet dans les années 90 et en 2003 et 2004. J'estime que le tarif d'achat n'est pas utilisé correctement en Europe actuellement. À l'origine, il ne devait pas servir de subvention. J'entends sans arrêt dire qu'il s'agit d'une forme de subvention bien trop importante.

Le tarif d'achat n'était pas destiné à constituer une subvention ou un revenu. Il avait pour but de garantir un environnement financier sûr pendant 20 ans pour ces projets. Ainsi, des capitaux à bas coût auraient été investis, ce qui aurait pu entraîner la réalisation d'un plus grand nombre de projets. Le faible coût du capital aurait permis un faible coût de l'électricité. Telle était notre intention initiale. Il faut poursuivre ce mouvement et rétablir le sens initial du tarif d'achat. C'est quelque chose de très important pour les banques. Protégez le tarif d'achat, qui joue un rôle essentiel dans l'apport de capitaux à ces projets. Une fois ces capitaux perdus, il sera trop tard. Tout est une question de confiance. Assurez-vous de la garder.

Il existe aux États-Unis des crédits d'impôt en faveur de mesures de diversification du mix énergétique. N'oublions pas que les accords d'achat d'énergie ont été imaginés par l'industrie les producteurs indépendants d'énergie (IPP) des États-Unis. Il existait ainsi le contrat de vente d'énergie, le contrat d'achat d'énergie et les accords d'achat pour ces projets. Croyez-moi, lorsqu'un projet fait l'objet d'un financement sans recours, cela ne signifie pas que ses acteurs nous importent peu. C'est plutôt l'inverse. On pense à tort dans ce secteur que parce que les projets sont financés, l'apparence du projet prime sur ses participants.

Dans le cadre d'un financement sans recours, les participants au projet sont très importants. Vous comptez sur eux, sur leur réputation et sur leur implication dans le bon déroulement du projet. Vous ne disposez d'aucun recours légal, ce qui vous contraint à miser sur leur intégrité. Il ne s'agit pas ici de favoriser l'entrepreneuriat. Il s'agit d'attirer de grandes entreprises et des fonds importants.

Lorsque nous étudions le financement d'un projet de ferme éolienne ou solaire, le projet constitue un problème et non une opportunité. L'opportunité réside dans les grandes entreprises qui sont derrière le projet. Quel est le degré de solvabilité du service public qui a conclu le contrat d'achat ? Combien de projets le sous-traitant chargé de l'ingénierie, de l'approvisionnement et de la construction a-t-il réalisés ? Pouvons-nous compter sur eux ? Avons-nous déjà travaillé avec eux ?



*Les nouveaux investissements dans les énergies renouvelables de 2004 à 2012*

Il en va de même pour le sous-traitant chargé des opérations et de la maintenance et pour celui chargé de l'approvisionnement en combustible. Tout est basé sur les relations avec les clients et la crédibilité. Il faut garder ce point à l'esprit, en particulier lorsque nous travaillons dans les pays en développement. Aujourd'hui, nous faisons la promotion des PME et de l'entrepreneuriat. Ce n'est pas la direction à suivre. Il est préférable d'attirer sur ces marchés des entreprises disposant de fonds importants, car nous sommes assurés de leur solidité financière.

L'autre élément qui a favorisé ce mouvement réside dans les capitaux propres des producteurs d'énergie indépendants. Souvenez-vous, il s'agit des développeurs qui ont travaillé sur des projets à base de gaz dans les années 90 avant de passer à l'éolien, au solaire et à la géothermie. Ils disposaient de davantage d'expérience, ainsi que des compétences et des fonds propres nécessaires. Le plus grand propriétaire éolien aux États-Unis est Nextera, une filiale non réglementée d'un service public réglementé. Elle dispose de fonds très importants et possède le plus grand nombre d'installations éoliennes et solaires des États-Unis.

Par ailleurs, ce qui s'est passé pendant cette période est fortement lié à la présence des banques européennes. Les banques américaines n'ont jamais prêté d'argent aux fermes éoliennes et aux projets solaires aux États-Unis. Et cela reste vrai aujourd'hui. Bank of America, Citi, JP Morgan et Wells Fargo ne sont guère intéressées. Ce sont les banques européennes qui ont joué le rôle de précurseur en venant aux États-Unis. Le coût de leurs capitaux était inférieur et elles disposaient d'experts. Elles ont remporté tous les mandats de financement. 90 % de la dette privilégiée prêtée à des fermes éoliennes sur la période que j'ai couverte étaient détenus par des banques européennes.

Lorsque les banques européennes ont commencé à se retirer en 2009 et 2010, les banques japonaises se désengageaient du Japon suite à la catastrophe de Fukushima. Elles ont cherché à placer leurs capitaux dans des actifs fixes aux États-Unis et à les y bloquer. Ainsi, le gouvernement japonais ne pouvait pas les récupérer, comme en Europe. Par chance, les sources de capitaux d'origine ont ainsi été remplacées par d'autres. Les banques américaines n'ont toutefois jamais investi dans le secteur. Aujourd'hui, nous ne finançons toujours pas réellement de projets, nous restons des banques d'affaires.

Toutefois, les États-Unis ont mis en place le système de capitaux propres fiscaux. Avec un crédit d'impôt sur investissement de 30 % et un crédit d'impôt sur la production valant 35 % du projet, nous disposons d'un système hybride. Ce système est appelé capitaux propres fiscaux, mais il s'agit en réalité d'un prêt. Il apparaît sous forme de capitaux propres pour permettre de bénéficier du crédit d'impôt. Appelez-le comme vous le souhaitez. Il s'agit d'un retour bloqué, tout comme un prêt. Nous avons également des banques. JP Morgan est le principal investisseur en capitaux propres fiscaux. Il ne s'agit pas de prêts, mais d'un système un peu meilleur, car il n'est pas nécessaire de compter sur le paiement d'intérêts. Vous êtes remboursé par des avantages fiscaux, bien plus sûrs. Nous avons réussi. Citi dispose de près d'un demi-milliard de dollars de capitaux propres fiscaux. Des entreprises telles que Google participent également. Ce mouvement fonctionne grâce à la fiscalité.

Quelle est la raison de ce succès ? Il est dû aux politiques publiques telles que le tarif d'achat et les mesures de diversification du mix énergétique. Ces politiques ont été du pain béni pour les industries IPP existantes, qui étaient déjà prêtes à s'attaquer aux nouvelles technologies. Elles ont été combinées à une situation plutôt favorable en termes de sources de capitaux et au final, tout s'est plutôt bien organisé.

Mais je suis un peu inquiet. Tous les pays du monde ne fonctionnent pas de la même façon. J'ai déjà évoqué les États-Unis et l'Europe, aussi vais-je aborder d'autres pays. En Amérique latine, l'activité est majoritairement axée sur l'éthanol. Elle est financée par des fonds et des investissements qui proviennent des entreprises. Il est intéressant de noter que l'éolien a explosé au Brésil grâce à la Brazilian Development Bank (BNDES). Il s'agit de la banque de développement du Brésil, l'homologue de KfW en Allemagne. Elle a développé ce marché. Elle ne finance pas des fermes éoliennes dirigées par le gouvernement. La BNDES a créé le marché en travaillant avec le gouvernement.

De nombreuses initiatives similaires sont menées actuellement en Afrique. Les informations sur les partenaires sont capitales en Afrique. Il est nécessaire de disposer d'un grand nombre de partenaires. Lorsque vous disposez de nombreux partenaires et de fonds suffisants, vous pouvez faire avancer vos projets. Toutefois, les fonds proviennent de donateurs. La Banque Mondiale (BM), la Société financière internationale, et la Banque Européenne d'Investissement (BEI) ont participé à ces projets. Tous ces organismes sont des banques de développement.

Peu de prêts commerciaux sont proposés, sauf s'ils sont garantis. Nous en avons réalisé quelques-uns, mais ils sont garantis par l'Exim Bank des États-Unis ou l'OPIC (Overseas Private Investment Corp.). La loi nous interdit de prêter de l'argent pour financer des projets à risque. Vous comprenez l'importance de ces agences de garantie. Nous pouvons financer des projets en Inde, en Afrique et en Amérique latine. Nous pouvons prêter de l'argent si ce prêt est garanti par l'Exim Bank, l'OPIC, la BNDES ou d'autres agences de garantie. Nous ne sommes pas autorisés par le régulateur à proposer des prêts dans d'autres conditions.

En Chine, le financement provient du secteur financier et est donc plutôt opaque. Les entreprises publiques s'associent aux banques publiques. Des activités commerciales ont bien été mises en place, mais elles n'ont pas été maintenues. Voilà pour l'histoire passionnante du financement des énergies renouvelables. J'espère que quelqu'un écrira un jour sur ce sujet.

Le point important à noter est que nous avons réussi. C'est vraiment très important. Nous pouvons nous en féliciter. Nous avons réussi à réunir de nombreux pays autour de politiques pour les énergies renouvelables. Ces pays s'impliquent, se laissent aller ou progressent, mais l'important, c'est qu'ils soient là. Enfin, nous avons réuni plusieurs entreprises exceptionnelles de ce secteur qui disposent de fonds importants et des compétences technologiques nécessaires. Il y a également les entrepreneurs comme Richard Swanson, qui a participé à cette conférence. J'étais vraiment très heureux de le voir intervenir, car nul n'a mieux réussi et n'est plus respecté que lui dans le secteur solaire. Il a créé Sunpower, qui est devenue une entreprise incontournable.

Il y a également les établissements financiers. Je ne connais aucune banque ni aucun fonds d'investissement qui ne soit pas engagé de manière active dans les énergies renouvelables. Il est nécessaire de maintenir cette situation. Il ne faut pas laisser les politiques publiques prendre du retard, car si la situation se détériore, il sera trop tard. Nous devons plaider auprès de nos supérieurs pour le recrutement de personnes expérimentées dans ce type d'investissements et de prêts. Sans ce personnel, nous ne pouvons pas participer aux projets.

Je tiens à vous dire que toutes les banques et tous les fonds d'investissement sont en train de réduire le personnel spécialisé dans les énergies renouvelables. C'est véritablement effrayant. Ce comportement est la conséquence directe de plusieurs facteurs : l'ajustement des tarifs d'achat et la fin du crédit d'impôt sur la production cette année. Ses effets vont se faire sentir pendant quelque temps. Le crédit d'impôt sur les investissements se terminera en 2016. Les dirigeants se demandent pourquoi maintenir du personnel spécialisé sur ce secteur alors qu'il va s'écrouler.

Comment puis-je affirmer que le secteur va continuer de se développer alors que les tarifs d'achat sont modifiés, les crédits d'impôt se terminent et les mesures de diversification du mix énergétique sont attaquées ? Il nous faut être fermes. Les politiques en place doivent être maintenues pour assurer la confiance de la communauté financière. Tel est désormais notre objectif. Il ne s'agit plus de s'amuser avec les politiques. Nous représentons 250 milliards de dollars par an et devons passer à 1000 milliards. Ces financements ne peuvent pas baisser. Il est impératif qu'ils continuent d'augmenter. S'ils commencent à baisser, la tendance ne fera que s'amplifier. Il faut éviter cette situation à tout prix.

Que devons-nous faire à présent ? Nous devons augmenter les financements. Je dois augmenter le personnel et non le réduire. Nous devons représenter 1000 milliards par an. Voilà notre objectif : être 4 fois plus gros qu'aujourd'hui. Nous recherchons des capitaux moins coûteux. Les taux d'intérêt augmentent et nous devons agir pour continuer à réduire le coût des capitaux. Nous devons atteindre les marchés de capitaux, car c'est là que se trouvent les capitaux les moins coûteux et à plus long terme. Nous parlons ici principalement d'obligations, mais aussi d'actions.

Nous travaillons sur des « obligations vertes ». Avant-hier, Euromoney a publié un cadre, rédigé par moi-même, réglementant l'utilisation des obligations vertes. J'ai reçu le concours de Bank of America, Goldman Sachs et JP Morgan nous ont également rejoints. Nous allons créer une catégorie « obligations vertes » sur le marché obligataire. La titrisation et la gestion du risque impliquent de regrouper des prêts et les transformer en obligations accessibles aux investisseurs. Les titres à revenus fixes et ce que l'on appelle « yield co » dissocient ces actifs et les

utilisent pour payer des dividendes. L'objectif est de se développer et d'obtenir des capitaux moins coûteux. Pour que nous réussissions, les politiques publiques doivent être extrêmement solides.

Il est intéressant de noter qu'une autre mesure doit être prise. Les tarifs d'achat sont en train d'être ajustés et notre cher Congrès américain ne parvient pas à se décider sur un plafond budgétaire. Cette situation commence déjà à peser sur la confiance de la communauté financière, alors que nous avons plus que jamais besoin d'une coopération public-privé extrêmement forte. Le secteur public doit coûte que coûte dérisquer ces investissements. Par le passé, les banques pouvaient prendre en charge et gérer un risque supérieur à celui d'une personne acquérant des obligations.

Imaginez que vous gérez l'argent de votre mère et que vous achetez des obligations. Achèteriez-vous les obligations émises par une ferme éolienne ? Elle rencontrera fatalement des difficultés au cours de sa vie. C'est pour cette raison que les banques sont intervenues : elles disposent des compétences nécessaires pour refinancer ou renégocier les activités en difficulté. Toutefois, les acquéreurs d'obligations ne disposent pas du personnel nécessaire. Ils ne sont pas autorisés à investir dans ce type de produits, qui doivent donc être dérisqués. Ces produits doivent inclure une assurance contre le risque, ainsi qu'un rehaussement

de crédit pour intéresser les investisseurs des marchés de capitaux.

Nous avons investi 250 milliards par an. En tout, nos investissements dans les énergies renouvelables atteignent 1 milliard de dollars. Je pense que nous aurons dépassé le milliard d'ici la fin de l'année. Mais vous savez quoi ? Les marchés de capitaux du monde entier représentent près de 130 milliards de dollars. Pas mal, non ? Ces 130 milliards sont constitués de 74 milliards en obligations et 56 milliards de capitaux propres. Nous approchons de 1 % du capital mondial. Ces chiffres remettent nos investissements en perspective. Nous pouvons nous féliciter du chemin que nous avons accompli, car nous venons de loin !

Toutefois, nous ne faisons que commencer à attirer l'attention de ces investisseurs en capitaux qui cherchent où investir. Nous avons besoin d'une stabilisation des politiques et d'une réduction du risque grâce à l'intervention des gouvernements et du secteur de la finance pour le développement. Je souhaite que l'IFC devienne une compagnie d'assurance qui propose une réduction du risque à l'aide d'investissements privés en Afrique et en Amérique latine. Toutefois, elle ne proposera plus directement ce type de prêt. Je pense qu'en basculant le rehaussement de crédit sur le secteur public, nous parviendrons à canaliser de nombreux investissements vers le secteur des énergies renouvelables.

## LES PROGRAMMES DE SOUTIEN AU DÉPLOIEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

### Christian de GROMARD

*Chef de projet énergie, Division Transport et Energie Durables à l'AFD*

Je suis heureux d'être ici pour fêter ce quarantième anniversaire de la journée du solaire à l'UNESCO, qui a été pilote dans ce domaine des énergies renouvelables, domaine qui a bien évolué depuis.

Je vous propose d'évoquer comment l'AFD en particulier et les banques de développement en général interviennent sur cette thématique des énergies renouvelables.

Le « groupe AFD » associe une institution financière publique l'AFD, sa filiale PROPARCO (qui prête au secteur privé) et un centre de formation le CEFEB. Elle abrite également le FFEM (Fonds Français pour l'Environnement Mondial), le pendant bilatéral du FEM (Fonds de l'Environnement Mondial), qui octroie des subventions additionnelles pour des projets à impacts positifs sur le changement climatique.

L'AFD intervient essentiellement dans les pays en développement ou émergents, avec une priorité donnée au continent africain. Elle finance également des collectivités locales et des projets dans l'outre-

mer français, où elle est active sur les énergies renouvelables.

L'AFD totalise aujourd'hui 7 à 8 milliards d'euros d'engagements par an, dont 1,5 à 2 milliards sur l'énergie, ce qui montre l'importance de l'énergie, qui pèse pour environ près du quart de ses engagements.

Elle met en œuvre une grande variété d'outils financiers, au bénéfice d'emprunteurs qui peuvent être publics ou privés, et selon des circuits différenciés qui peuvent s'adapter aux spécificités des investissements d'énergies renouvelables.

L'agence s'est dotée en 2007 d'une première stratégie énergie pour la période 2007-2012, qui privilégiait les énergies sobres en carbone, ce qui était alors assez novateur. Cette stratégie a été renouvelée en 2012, en maintenant comme premier axe d'intervention « l'énergie durable ». Le deuxième axe d'intervention de cette stratégie porte sur « l'accès à l'énergie », mais à une échelle moindre en termes d'engagement. Nos priorités se situent donc bien à l'articulation des deux thèmes de la journée.

Je vous ai explicité les montants d'engagement de 2012, qui font bien ressortir la part prédominante de l'énergie durable, qui regroupe les projets d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables. Sur les projets classés dans cette catégorie, on peut retenir qu'environ deux tiers portent sur les énergies renouvelables et un tiers sur l'efficacité énergétique.

L'énergie durable apparaît comme une importante priorité dans toutes nos zones d'intervention. La proportion de nos engagements en matière d'accès à l'énergie est plus faible. Il s'agit d'une thématique où les projets d'investissement restent peu nombreux avec des montants limités.

Globalement depuis six ans, les énergies renouvelables représentent plus de 3 milliards d'euros engagés par l'AFD.

C'est une évolution sensible qui montre que l'AFD s'est maintenant réellement mobilisée sur les énergies renouvelables. Ceci est également vrai pour nos collègues de la KfW, de la Banque Mondiale, ou de la Banque Européenne d'Investissement. Je pense que cette tendance va se maintenir, les stratégies énergétiques de ces banques donnant elles aussi la priorité aux énergies renouvelables. C'est une bonne nouvelle pour le secteur.

Pour entrer dans le vif du sujet, l'intérêt d'associer énergies renouvelables, efficacité énergétique et actions sur la demande, déjà largement évoqué dans les présentations précédentes, s'applique aussi aux pays en développement ou émergents. Dans ces pays, qu'ils soient méditerranéens, africains ou asiatiques, la question de l'indépendance énergétique se pose également, mais selon des modalités d'application qui sont cependant différentes.

Les institutions sont en général moins structurées sur la thématique de l'énergie durable. Les qualités de réseaux sont également très différentes et posent des problèmes spécifiques aux pays en développement. L'intégration des énergies renouvelables ne peut donc pas se faire de la même façon que dans les pays du Nord. Par exemple, les solutions de « feed-in-tariff » ne peuvent pas être copiées telles quelles dans ces pays et ne sont pas nécessairement adaptées.

Un point particulier, important pour l'AFD qui s'est donnée comme priorité d'action le continent africain, reste la question de l'accès à l'énergie.

En Afrique subsaharienne, plus de 50 % de la population n'a pas accès à l'électricité et une majorité ne dispose pas de réseau. Cela représente pratiquement 80 % de sa population rurale. Les questions d'énergie renouvelable dans ces zones « hors réseau » se posent de manière radicalement différente que dans celles qui bénéficient d'infrastructures énergétiques.

Un autre aspect très important tient au fait que la majorité de la population en Afrique, et dans beaucoup de pays émergents, repose pour son approvisionnement énergétique sur la biomasse qui

est une énergie renouvelable, si elle est correctement gérée. On parle beaucoup d'éolien et de solaire dans les instances internationales et, à mon avis, pas assez de biomasse. C'est une énergie essentielle pour ces pays et qui mérite aussi toute notre attention, aussi bien pour ses applications traditionnelles que pour celles plus modernes.

Il faut aussi souligner la grande diversité des énergies renouvelables qui aujourd'hui présentent une large palette de filières et d'applications. En matière d'hydroélectricité, les ouvrages vont de plusieurs milliards de kilowatts pour les plus gros, à des centaines de MW pour des projets nationaux, voire à quelques kilowatts pour des microprojets locaux. Ces différentes gammes de projets ne peuvent bien évidemment pas être traitées de la même façon.

On constate aussi de grandes différences de maturités des technologies et de coûts de production de l'énergie. Les coûts du kWh peuvent s'échelonner de 2 ou 3 centimes d'euros pour de l'hydroélectricité jusqu'à plusieurs dizaines de centimes d'euros pour des filières plus novatrices et encore peu compétitives. On peut noter cependant que beaucoup de filières d'énergie renouvelables sont aujourd'hui compétitives en Afrique en particulier, et dans les pays en développement en général, avec des coûts de production en dessous de 10 centimes le kWh, alors que dans beaucoup de ces pays, et en particulier ceux à prédominance d'électricité d'origine thermique, les coûts de production de l'électricité conventionnelle dépassent les 10 centimes d'euros/kWh. Dans beaucoup de pays en développement, la parité de certaines énergies renouvelables en réseau est déjà effective. Comment expliquer que ces énergies renouvelables ne se développent pas plus rapidement dans ces pays? Cela tient au coût d'accès au capital. Il est plus cher et les projets d'investissement sont donc moins nombreux dans les pays en développement. Il existe une aversion au risque plus forte et compréhensible dans des pays où l'environnement financier institutionnel est moins stable. Ces pays ont tendance à privilégier le fossile moins capitalistique, quitte probablement à aller dans le mur dans une quinzaine ou une vingtaine d'années. Mais c'est la réalité que l'on observe.

Dans la mesure où l'AFD intervient essentiellement en prêts, elle privilégie les sources d'énergie qui sont rentables économiquement. Même si l'AFD peut prêter à des conditions compétitives, les projets doivent s'appuyer sur un business model viable, pour permettre une capacité de remboursement d'emprunt. L'AFD et les banques de développement sont plus à l'aise avec certaines sources d'énergie renouvelables : l'hydroélectricité très clairement, l'éolien et le photovoltaïque de plus en plus, et la géothermie sont les filières qu'elles financent en priorité.

Un point remarquable des énergies renouvelables doit être souligné : ces énergies permettent de raccourcir la chaîne énergétique, trois cas pouvant être distingués, (i) les énergies renouvelables de puissance centralisées, (ii) celles réparties sur le réseau de puissance plus modestes et (iii) enfin les énergies décentralisées hors réseau, qui restent de faible puissance.

Les premières concernent l'hydroélectricité (grande ou moyenne), la géothermie ou le solaire thermodynamique (CSP). Les projets peuvent atteindre plusieurs centaines de Mégawatts (MW). Cette catégorie correspond à des montants de prêts de plusieurs dizaines voire centaines de millions d'euros, courants pour nos institutions financières. Ces projets s'intègrent « naturellement » dans les plans d'investissement des pays dans lesquels nous travaillons.

Il y a plus de difficultés pour intervenir dans les projets d'énergies réparties sur le réseau, de quelques MW à quelques dizaines de MW et qui présentent un caractère variable. Ces projets, qui soulèvent des questions d'intégration dans les réseaux, se développent dans certains pays émergents mais restent limités dans beaucoup de pays moins avancés.

La catégorie la plus difficile à traiter reste cependant celle des énergies décentralisées, « hors réseau », beaucoup plus difficiles à développer techniquement et financièrement. L'adéquation de l'offre et de la demande nécessite un travail spécifique en amont. Les opportunités d'investissements sur le « hors réseau » sont rares et les investisseurs restent très peu nombreux. On parle beaucoup de projets d'énergies renouvelables décentralisées, mais dans la pratique très peu d'Etats et d'opérateurs mobilisent des financements sur cette catégorie « hors réseau ».

Comment l'AFD intervient sur les investissements énergies renouvelables et comment en particulier mobilise-t-elle des financements publics ?

L'AFD reste peu outillée pour financer ce qui est encore expérimental, car sur l'énergie elle intervient surtout en prêt et ne dispose que de très peu de subventions. Il est clair que dans leurs phases initiales de développement, les énergies renouvelables se financent difficilement en prêt. Il faut d'autres outils dont nous ne disposons pas en tant que bailleurs de fonds. L'AFD intervient donc sur les énergies renouvelables dans leurs phases de pré-diffusion et de diffusion. Pour ce qui concerne les fonds publics, nous mettons l'accent sur la pré-diffusion. Dans les pays du sud, ce sont les premiers projets à grande échelle d'éolien, de solaire, de biomasse, ou de géothermie, sur lesquels les bailleurs de fonds apportent le plus de valeur ajoutée.

Lorsque nous intervenons en subventions, celles-ci ne portent pas en général sur l'investissement, mais sur l'assistance technique, pour accompagner les projets et pour appuyer la mise en place de politiques

ou de cadres réglementaires, nécessaires pour que l'investissement puisse se déployer.

Pour finir, je voudrais préciser quelques outils de prêts que nous utilisons sur ces projets d'énergies renouvelables, en prenant en compte la diversité des niveaux de maturité des projets et des cadres dans lequel ils s'inscrivent. Ce n'est pas du tout pareil de financer des énergies renouvelables en Afrique, dans un pays comme le Burkina Faso, où nous instruisons un projet de centrale solaire, qu'en Afrique du Sud. Ce sont autant de contextes qui demandent d'adapter les financements et nous nous efforçons de faire du sur-mesure avec les outils dont nous disposons.

Le principal outil reste le prêt public, souverain ou non souverain, c'est-à-dire soit en risque projet soit en risque Etat. Dans le cadre de l'aide publique au développement, des institutions comme l'AFD peuvent proposer des prêts de long terme (jusqu'à 20 ou 25 ans), avec du différé (5 ans) à des taux compétitifs. Ces concours peuvent aussi intégrer des mécanismes de sécurisation du risque qui facilitent l'investissement. Ces financements sont très intéressants pour les énergies renouvelables qui sont capitalistiques : le kilowatt heure, par exemple solaire ou éolien, peut coûter 25 ou 30 % de moins que s'il était financé par le seul secteur privé qui par nature serait obligé de couvrir son risque et de présenter une meilleure rentabilité financière. Ce point est important dans des géographies en développement et nous permet d'intervenir là où le privé seul a du mal à s'engager. Dans les pays, où la filière énergie renouvelable est plus mature et se développe de manière autonome en mobilisant l'investissement privé, nous ne mobilisons plus de concours publics, c'est le cas de l'éolien en Inde. Par contre, nous instruisons dans ce pays une ligne de crédit dédiée au solaire PV, qui reste encore innovant. En Chine, nous travaillons sur un projet de biodiesel d'origine forestière, la filière restant à structurer en s'appuyant sur des projets de reforestation à base d'oléagineux locaux, et en intégrant plusieurs innovations.

Le deuxième outil, qui se développe est bien adapté pour financer les énergies renouvelables, il s'agit d'un mix prêts-dons. J'espère que ce mix va nous permettre de travailler plus sur l'accès à l'énergie, en particulier dans le cadre de l'initiative SE4ALL et des facilités qui se mettent place au niveau de l'Union européenne, avec un focus sur l'Afrique subsaharienne. Nous espérons développer de nouveaux projets sur cette thématique de l'accès en mobilisant des prêts, la subvention venant en complément, ce qui implique d'identifier des investisseurs et des projets d'un montant suffisant, pour pouvoir structurer de tels prêts.

Pour favoriser l'initiative privée et les partenariats publics privés (PPP), outre les prêts de Proparco, l'AFD a développé avec des banques locales des lignes de crédit dédiées aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique.

Ces lignes permettent de financer des projets de montants plus limités que ceux traditionnellement financés par les banques de développement et de les démultiplier.

Pour conclure, au sein des banques de développement, et de l'AFD en particulier, depuis 5 à 6 ans on constate un réel changement sur les énergies renouvelables, avec une implication croissante de ces banques sur cette thématique. Il existe aussi une volonté d'en faire plus sur l'accès à l'énergie, mais de réelles difficultés subsistent pour structurer des projets d'investissement, avec des contraintes fortes sur les subventions, qui restent nécessaires pour développer les énergies renouvelables hors réseau et pour l'assistance technique.

Ces subventions sont malheureusement de plus en plus rares et pour reprendre une expression d'un collègue de l'ADEME : « Le soleil est renouvelable mais les subventions le sont de moins en moins ».



## SESSION IV

### Synthèse et propositions

**Osman BENCHIKH**

*Responsable du Programme Énergies Renouvelables, UNESCO*

L'évolution récente relative à l'approvisionnement en énergie, à son coût et à son importance dans l'économie, a conduit tous les pays à formuler et à mettre en œuvre des politiques visant à améliorer l'efficacité des modes de consommation d'énergie, à accroître sa conservation, à explorer et mettre en valeur des sources d'énergies nouvelles et renouvelables.

L'énergie est un besoin vital pour la société, dont l'enjeu est double. Elle représente d'abord le niveau de vie et de développement des populations et aussi - on en prend de plus en plus conscience - le niveau de risque environnemental et économique dans lequel elles vivront.



Conscients du rôle que peuvent jouer les énergies renouvelables dans le système énergétique global, notamment au regard de l'approvisionnement en énergie des zones rurales, la plupart des Etats expriment de plus en plus le souhait, justifié par ailleurs, de mettre en place des politiques nationales sur les énergies renouvelables accompagnées de formations appropriées sur ces « énergies ».

Les dernières décennies ont ainsi vu un intérêt croissant au développement des énergies renouvelables notamment dans le contexte du développement durable ainsi que celui lié au changement climatique et la lutte contre la pauvreté. Cependant, beaucoup reste à faire en matière d'éducation et de formation dans ce domaine.

L'absence de programmes d'éducation et de formation ambitieux s'explique notamment par : (I) l'interdisciplinarité du sujet et sa diversité et (II) la non-reconnaissance de ce sujet comme composante majeure du thème « Énergie ». Par ailleurs, les aspects généraux des besoins en formation sont à examiner sous deux angles : quelles « cibles » pour l'enseignement et quelles matières doivent être enseignées ?

Bien évidemment les besoins d'aujourd'hui dépendent des perspectives actuelles d'emploi. Les différentes filières d'énergies renouvelables sont une mine d'emplois nouveaux. Des dizaines de milliers d'emplois ont déjà été créés en quelques années. La localisation et la nature de ces emplois évoluent rapidement en même temps que leur nombre s'accroît : c'est donc un secteur où une politique de formation convenable est indispensable.

Les énergies renouvelables requièrent divers composants pour construire des systèmes complets. Ces composants doivent encore être améliorés par une intensification de la recherche et développement et une production industrielle plus efficace. Mais plutôt qu'un manque de recherche fondamentale, une des barrières principales à leur développement présent est le manque de personnel formé à concevoir, installer et assurer la maintenance des systèmes complets.

La plupart des nouveaux emplois ne demandera pas de compétences radicalement nouvelles. Par exemple, le savoir de base des ingénieurs concepteurs et des architectes pourrait être suffisant, mais un changement de leur comportement est nécessaire. Ils sont habitués à des systèmes conventionnels qu'on peut utiliser n'importe où et quel que soit l'environnement. Au contraire, les technologies utilisées dans le domaine des énergies renouvelables sont influencées par le site d'installation, le climat et elles interagissent avec le consommateur. Elles exigent en général plus de travail de conception, d'adaptation, de mise au point des sites et des systèmes que tout autre système basé sur les combustibles fossiles. Ceci requiert davantage d'emplois pour obtenir des systèmes efficaces et durables.

Des considérations spécifiques à la formation des chercheurs, ingénieurs et techniciens supérieurs, à l'information des décideurs, élus locaux, et du grand public en général, devraient faire l'objet d'une meilleure prise en compte. La formation des techniciens est l'une des actions les plus urgentes car nécessaire à la réussite des programmes d'énergies renouvelables.

## I. Formation des techniciens

Les techniciens auront un rôle primordial à tous les stades des projets liés à l'utilisation des énergies renouvelables. En effet, ils auront à intervenir au niveau du laboratoire, des centres d'essais, de la production industrielle des composants, de la distribution commerciale, de l'assemblage des systèmes, de leur installation, de leur entretien et de leur maintenance. Le succès des projets ne sera donc possible que si chaque étape est elle-même menée avec succès grâce à l'action de techniciens compétents.

## II. Formation des chercheurs

Les performances et les coûts des systèmes d'énergies renouvelables, sont susceptibles d'amélioration régulière substantielle. Sous l'impulsion des programmes d'électrification décentralisée et de l'expansion du marché qui en résultera, les progrès dans ce secteur seront naturellement accélérés. Cette dynamique induira un accroissement de l'effort industriel et justifiera de ce fait un renforcement des moyens de recherche dans ce domaine. A titre d'exemple, il faut souligner l'intérêt de promouvoir un important programme de recherches dans un secteur relativement nouveau, celui de la chimie solaire pour la production de combustibles.

## III. Formation des ingénieurs

La réalisation des programmes d'énergies renouvelables, constitue un immense projet industriel pour les décennies à venir. Les pays industrialisés pourront de toute évidence apporter une contribution appréciable à cette tâche, ce qui entraînera des conséquences bénéfiques au plan de la création d'emplois. On peut aussi espérer que cette dynamique entraîne le développement d'une industrie dans les pays utilisateurs, susceptible d'apporter une contribution majeure à la réalisation des programmes liés à l'accès à l'énergie pour tous.

L'essor industriel prévu sur l'électricité éolienne et solaire, les biocarburants, l'architecture passive exigent d'être animés par de nouvelles générations d'ingénieurs dont le travail, les initiatives et les compétences seront les meilleurs garants du succès. On voit donc clairement apparaître la nécessité d'assurer la formation de cette future élite d'ingénieurs qui aura à créer, organiser et animer l'industrie solaire des prochaines décennies.

## IV. Information des décideurs, des élus locaux et des services techniques

L'expérience montre que le principal obstacle au développement des technologies des énergies renouvelables est souvent lié à l'inertie au niveau de la production et distribution de l'électricité, et celui dans la prise de décision pour le choix des options et équipements énergétiques dans les communes ou les régions concernées.

Pour un électricien, l'électrification rurale est souvent synonyme de développement et d'extension du réseau interconnecté. Pour l' élu local, qui n'a pas une bonne connaissance de l'éventail des technologies disponibles, s'en remettre aux sociétés nationales d'électricité, c'est souvent choisir la sécurité, par inertie ou par habitude. Il faut donc convaincre à la fois les cadres des sociétés d'électricité et les élus locaux que le recours aux technologies des énergies renouvelables est un atout pour tous, un complément aux interconnexions et qu'il n'y a pas nécessairement antagonisme entre le réseau interconnecté et les technologies des énergies renouvelables décentralisées.

## V. Information du grand public

Le travail de formation et d'information mentionné ci-dessus sera également à entreprendre auprès du grand public qui ignore aujourd'hui la plupart des réalisations, des possibilités et des perspectives des technologies d'énergie renouvelable.

Dans les pays où devront être réalisés des programmes d'énergie renouvelables et où les populations auront un contact direct avec les équipements (solaires par exemple), cette information rejoint celle de l'utilisateur. C'est donc un vaste travail de formation et d'information du grand public qu'il convient d'entreprendre.

La formation de spécialistes en énergies renouvelables est basée sur les savoirs habituellement enseignés dans les différentes disciplines et aux différents niveaux, mais exige des compléments spécifiques. Ces compléments sont de deux ordres : d'une part une culture générale apte à faire comprendre la place éminente qui est et sera celle des énergies renouvelables, d'autre part un approfondissement technique particulier à chaque filière et fournissant les clefs d'un travail de terrain efficace dans les conditions d'utilisation de cette filière. Nous recommandons, pour toute formation, un travail de préparation nécessitant des experts généralistes de l'énergie et des personnes compétentes sur chaque filière envisagée; ces deux types d'enseignants apporteront leur contribution et leur expérience au programme à mettre au point.

## François MOISAN

Directeur exécutif Stratégie, Recherche et International, ADEME

Je voudrais rendre hommage à ceux qui ont été à l'initiative de cette manifestation. En premier lieu, à Wolfgang Palz, qui a impulsé et porté ce projet, et nous a incités à le mettre en œuvre. Je salue également l'implication sans faille de Daniel Lincot. Et du côté de l'ADEME, je remercie Dominique Campana et son équipe qui ont œuvré durant plusieurs mois pour préparer et organiser cet événement.

Parler de 40 ans d'histoire des énergies renouvelables, sans verser dans la nostalgie et les regrets, c'était le défi à relever et je crois que cette journée riche d'expériences et d'échanges en est la preuve. Et pour parler d'une période aussi longue -40 ans ont passé- et des 40 années à venir, à l'horizon 2053, être accueilli par le CNRS était une évidence car il fallait que ce soient des scientifiques qui nous fassent part, du moins en première partie de journée, de leur vision du passé et du futur.



Quand Joël Bertrand a évoqué le fait que le CNRS avait lancé le premier programme interdisciplinaire sur l'énergie solaire, cela m'a touché, car je faisais partie de l'équipe de direction du PIRDES au moment de sa création, avec Robert Chabbal, Pierre Matarasso, qui est dans la salle, et bien sûr, tous les autres.

Deux choses m'ont frappé dans les présentations des scientifiques. Les perspectives qui paraissaient audacieuses il y a trente ans pour certaines filières, ont été dépassées. Et même si l'on entend encore aujourd'hui « Vos projections sur les énergies renouvelables sont très ambitieuses, etc. », le fait est que, sur certaines filières en tous cas, ces projections sont largement dépassées, comme on a pu le voir aujourd'hui.

Mais pour autant, tout cela ne s'est pas fait tout seul. Travaillant moi-même dans un lieu qui n'est pas le lieu de la recherche, je vis au quotidien avec l'impression que les choses balbutient, qu'il y a des piétinements, que les décisions politiques

ne suivent pas assez rapidement les espoirs qui ont été mis dans les technologies.

Malgré cela, même s'il faut rendre grâce à la recherche et à l'industrie, bien sûr, on ne peut nier que les choses ont également évolué grâce à des politiques publiques mises en œuvre et aux décisions prises par les pouvoirs publics.

Bien sûr, il y a des décisions prises pour soutenir la recherche et pour avoir les crédits afférents. Mais au-delà de la recherche, il y avait des décisions de soutien à ce que l'on a souvent appelé l'ouverture des marchés. Je me souviens des critiques formulées alors et encore aujourd'hui. Cette politique de soutien a un coût, certes ; mais avoir des niches de marchés pour certaines filières, des tarifs d'achat incitatifs, etc., tout cela contribue au développement de ces technologies. Et cela a également joué un rôle important au niveau de l'innovation, pas seulement sur l'ouverture des marchés.

Précédemment, j'ai été aussi très impressionné par ce qu'a dit Michael Eckhart sur le besoin de garanties de résultats et sur le rôle des pouvoirs publics pour sécuriser le financement d'une nouvelle filière.

Je me suis senti concerné par le fait qu'à l'ADEME, actuellement, nous gérons des crédits d'Investissements d'Avenir. En effet, sur les énergies renouvelables, l'ADEME a été dotée d'un peu plus de 1 milliard d'euros qu'elle utilise encore, auxquels viendront s'ajouter 800 millions dans ce que l'on appelle le Programme des Investissements d'Avenir 2 pour poursuivre le soutien de ces filières. Le rôle qui nous est assigné, en tant que pouvoirs publics, est, de prendre le risque avec les entreprises et les investisseurs, sur l'innovation. Donc, nous ne sommes pas sur l'industrialisation proprement dite, mais sur l'innovation. Et ce risque inhérent que l'on partage, que l'Etat partage avec les entreprises, c'est quelque chose qu'il faut développer, bien sûr. C'est le rôle de l'Etat et ce le sera pour l'émergence de nouvelles filières.

Dans la dernière session, on a pu voir sur l'accès à l'énergie une nouvelle dimension. Il ne s'agissait pas seulement de celle du développement des énergies renouvelables dans les pays riches –qui ont certes des contraintes, notamment budgétaires actuellement- mais aussi de voir l'intérêt de ces énergies renouvelables par rapport aux enjeux des pays du Sud.

J'ai été frappé par le fait que l'on n'a plus ce que l'on avait il y a quelques années, cette opposition entre favoriser l'accès à l'énergie ou l'efficacité énergétique. En effet, tous les pays présentent ensemble efficacité énergétique et développement des énergies renouvelables.

Néanmoins, la présentation de Houda Allal de l'OME nous a montré l'enjeu. Ces chiffres nous concernent, nous interpellent. La croissance de la consommation d'électricité dans les pays de la rive sud de la Méditerranée, est quelque chose auquel on n'a pas été préparé. Et on voit bien que l'on rentre dans une nouvelle ère, où il ne s'agit pas seulement d'avoir des objectifs plus ou moins atteignables, mais des défis à relever. Et les énergies renouvelables seront, non pas la totalité bien sûr, mais une composante essentielle de la réponse sur le long terme. Et là encore, c'est une dimension de long terme à laquelle il faut s'intéresser.

Pour conclure, je voudrais dire que la question qui se pose à nous – je parle plus au nom de l'ADEME et en tant que représentant des pouvoirs publics d'une certaine façon – c'est finalement de savoir quel doit être le rôle des pouvoirs publics par rapport à ces défis. Aujourd'hui cela a été illustré,

les pouvoirs publics doivent partager une vision de long terme, en déduire les objectifs crédibles, et surtout une trajectoire que je dirais résiliente, c'est-à-dire qui devra s'adapter aux différentes évolutions du contexte.

En France, c'est ce que l'on a essayé de faire avec le débat sur la transition énergétique. Mais cet exercice a été très national, la composante internationale n'était en effet pratiquement pas existante.

Ce que l'on a fait aujourd'hui pourrait être un prélude à ce que l'on pourrait essayer de faire à un niveau plus international, à savoir partager des visions entre la rive sud et la rive nord, entre des pays en développement et des pays plus développés, et regarder comment partager, cette fois entre Etats, des perspectives résilientes sur ce que pourrait être le devenir des énergies renouvelables, et bien sûr le devenir de l'humanité.

## Jean-Yves MARZIN,

Directeur de l'Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes du CNRS

Mesdames et Messieurs, chers collègues, bonjour. C'est à moi qu'incombe la délicate mission de conclure cette journée d'étude, je devrais dire ce marathon.

Je tiens tout d'abord à féliciter l'ensemble des intervenants à la fois pour la qualité de leurs présentations et pour avoir réussi à faire passer des messages forts dans des temps de parole extrêmement limités.

Personnellement, je retiens tout d'abord de cette journée que, même si elles n'offrent pas toutes le même potentiel, loin s'en faut, en termes de gisements, de performances et même de coûts, les différentes filières renouvelables présentées sont toutes susceptibles de contribuer à des degrés divers à nos futurs mix énergétiques. Nous l'avons vu, toutes se développent à un rythme plus ou moins soutenu.

On nous explique souvent qu'il est nécessaire de privilégier telle ou telle filière, donc de prioriser les investissements à faire en matière d'énergies renouvelables. Mais pour faire des choix, il me semble primordial d'aborder le problème dans toute sa complexité et d'avoir une vision à long terme. Je crois que les exposés que j'ai entendus aujourd'hui y ont contribué et les études prospectives s'efforcent maintenant d'intégrer les différents paramètres économiques, environnementaux, sociétaux, etc.

D'un autre point de vue, bien qu'elles soient difficiles à anticiper, de possibles avancées de la recherche fondamentale et des innovations de rupture peuvent à elles seules changer le devenir de technologies, comme l'a illustré l'exposé de Masafumi Yamagushi. Grâce à des rendements de conversion record qui atteignent aujourd'hui 45 % en laboratoire, les technologies

photovoltaïques à concentration, sur lesquelles personne ne misait il y a 20 ans, commencent à pénétrer le marché pour les régions à fort ensoleillement direct.

Je pourrais citer d'autres exemples, notamment dans le domaine des énergies marines dont nous avons entendu ce matin un bref aperçu, avec des concepts encore peu explorés, tels que la production d'énergies osmotiques, qui a donné lieu récemment à des avancées spectaculaires dans deux laboratoires du CNRS. Mais je ne m'étendrai pas davantage sur ces exemples.

Des innovations de rupture sont encore attendues. Pour réussir à introduire massivement les énergies renouvelables dans les réseaux de distribution, les défis concernent le stockage de l'énergie, l'intelligence des réseaux, le Power to Gas, et à terme probablement l'hydrogène, autant de sujets qui furent traités au cours de la journée.

La législation et les politiques publiques en matière d'énergies renouvelables jouent et joueront à l'évidence un rôle clef. On peut rappeler par exemple que l'évolution de la législation européenne sur les métaux lourds a failli condamner la filière des couches minces photovoltaïques en tellure de cadmium, qui offrait pourtant d'excellents rendements de conversion et de faibles coûts.

Une solution heureusement a pu être trouvée par la mise en place d'une filière complète et structurée de recyclage.

Il faut veiller également, et cela a été bien illustré dans l'exposé d'Olivier Vidal tout à l'heure, à limiter l'empreinte environnementale des technologies mises en œuvre et aussi à la disponibilité des matières premières dans la perspective du déploiement de ces technologies à grande échelle.

Parmi les solutions envisageables, il s'agit de réduire bien sûr les consommations de matières, de développer les filières de substitution, de recyclage, bien que le recyclage – je l'ai bien compris – ait ses limites dans ce cas précis. L'analyse du cycle de vie s'avère un outil précieux pour évaluer précisément l'impact d'une technologie donnée.

Je souhaite également dire un mot sur le financement des énergies renouvelables. Dans un contexte économique difficile où le prix de l'énergie tend à augmenter avec la raréfaction des ressources énergétiques fossiles, des voix s'élèvent parfois pour dénoncer les subventions apportées au développement des énergies renouvelables et le préjudice qu'elles induisent sur le pouvoir d'achat des ménages.



Crédit photo : CNRS

Même si la politique des tarifs d'achat de l'électricité d'origine renouvelable qui a prévalu dans de nombreux pays, a eu des effets sans doute pervers auxquels il convient de remédier, suspendre totalement à court terme le soutien au développement industriel des énergies renouvelables reviendrait à condamner ces dernières. Plusieurs exposés d'aujourd'hui nous l'ont démontré.

A cet égard, le Président de la République a confirmé son souhait de soutenir le développement de ces énergies renouvelables, avec notamment l'annonce d'un appel à projets sur les fermes pilotes d'énergie marine ou des projets d'investissement d'avenir dédiés aux biocarburants, au biogaz, à l'hydrogène, etc. Mais il a également annoncé le remplacement des tarifs d'achat par un nouveau dispositif.

J'ai été un peu interpellé, c'est sans doute un constat de Michael Eckhart, par l'importance, des politiques publiques pour sécuriser le financement des énergies renouvelables.

Nous avons en Europe une politique de soutien au développement des énergies renouvelables qui peut s'inscrire dans la durée. L'Union européenne et la majorité de ses Etats membres dont la France, semblent désormais s'inscrire dans cette perspective.

L'objectif 3 fois 20 du Paquet Energie-Climat, soit 20 % d'émission de CO<sub>2</sub> en moins, 20 % d'efficacité énergétique en plus et 20 % d'énergies renouvelables à l'horizon 2020, illustre l'engagement européen. Et l'Etat français s'est engagé à porter la part des énergies renouvelables dans la production d'énergie finale, à 23 % à horizon 2020.

Avant le développement de son programme électronucléaire, la France avait choisi de miser sur les énergies renouvelables, en particulier sur l'énergie hydro-électrique. Cela a été rappelé aujourd'hui. Cela représentait plus de 50 % de sa production électrique en 1960. Elle avait misé encore sur les énergies marines lorsqu'elle mettait en service en 1967 la plus grande usine marémotrice du monde, l'usine de la Rance (elle a été citée) d'une capacité de 240 mégawatts.

Elle a été également pionnière en s'engageant dans le développement d'une centrale solaire à tour de 10 mégawatts thermiques, utilisant un cycle à sel fondu sur le site de Thémis dans les Pyrénées Orientales, qui a été stoppé prématurément après deux années seulement de fonctionnement.

Mais conséquence des chocs pétroliers et du choix tout nucléaire, les financements apportés à la R&D et aux investissements dans le domaine des énergies renouvelables ont fortement diminué entre le milieu des années 80 et le début des années 2000. L'industrie et la R&D françaises dans le domaine des énergies renouvelables ont perdu progressivement l'avance qui était la leur dans ce domaine.

La prise de conscience internationale de l'impact du réchauffement climatique causé par les émissions accrues de gaz à effet de serre dues aux activités humaines, et l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto en 2005, ont concouru à un regain d'intérêt pour les énergies renouvelables au plan international.

En France, le Grenelle de l'environnement et la loi de programmation fixant les orientations de la politique énergétique, ont contribué à la construction d'une nouvelle politique énergétique, prévoyant un développement plus important des énergies renouvelables.

Je souhaite également dire un mot sur la dimension sociale qui doit également être convenablement prise en compte dans nos réflexions et dans nos choix en matière d'énergies renouvelables ou non.

A l'évidence, l'énergie n'est pas qu'un défi scientifique, technique ou économique, c'est avant tout un défi de société.

On voit en France et dans d'autres pays, localement, des oppositions à certains projets d'implantation d'éoliennes ou des inquiétudes quant à l'utilisation des ressources agricoles pour la production de biocarburants.

Je souhaite ici dire combien il nous semble important au CNRS de dépasser les simples considérations d'acceptabilité, pour aborder convenablement la dimension sociale liée au développement des énergies renouvelables. Il faut bien sûr associer en amont les citoyens aux choix publics en matière d'énergies, c'est-à-dire dès le stade de la réflexion. Il est également essentiel d'intégrer les sciences humaines et sociales dans les programmes de recherche interdisciplinaires sur les énergies renouvelables.

L'accès à l'énergie pour tous a été abordé dans la dernière session de cette journée, avec plusieurs exemples qui illustrent bien le développement des énergies renouvelables sur le continent africain, qui possède rappelons-le, des ressources renouvelables, en particulier en solaire, extraordinaires.

Plusieurs actions récentes ont été présentées comme celle de l'Observatoire Méditerranéen de l'Energie ou celle de l'Agence Française de Développement.

Il faut saluer tout particulièrement l'initiative des Nations Unies, Sustainable Energy For All (SE4All), dont le programme d'action a été lancé à l'occasion du sommet RIO+20. L'Union européenne a d'ailleurs annoncé une contribution exceptionnelle de 460 millions d'euros de soutien à cette initiative.

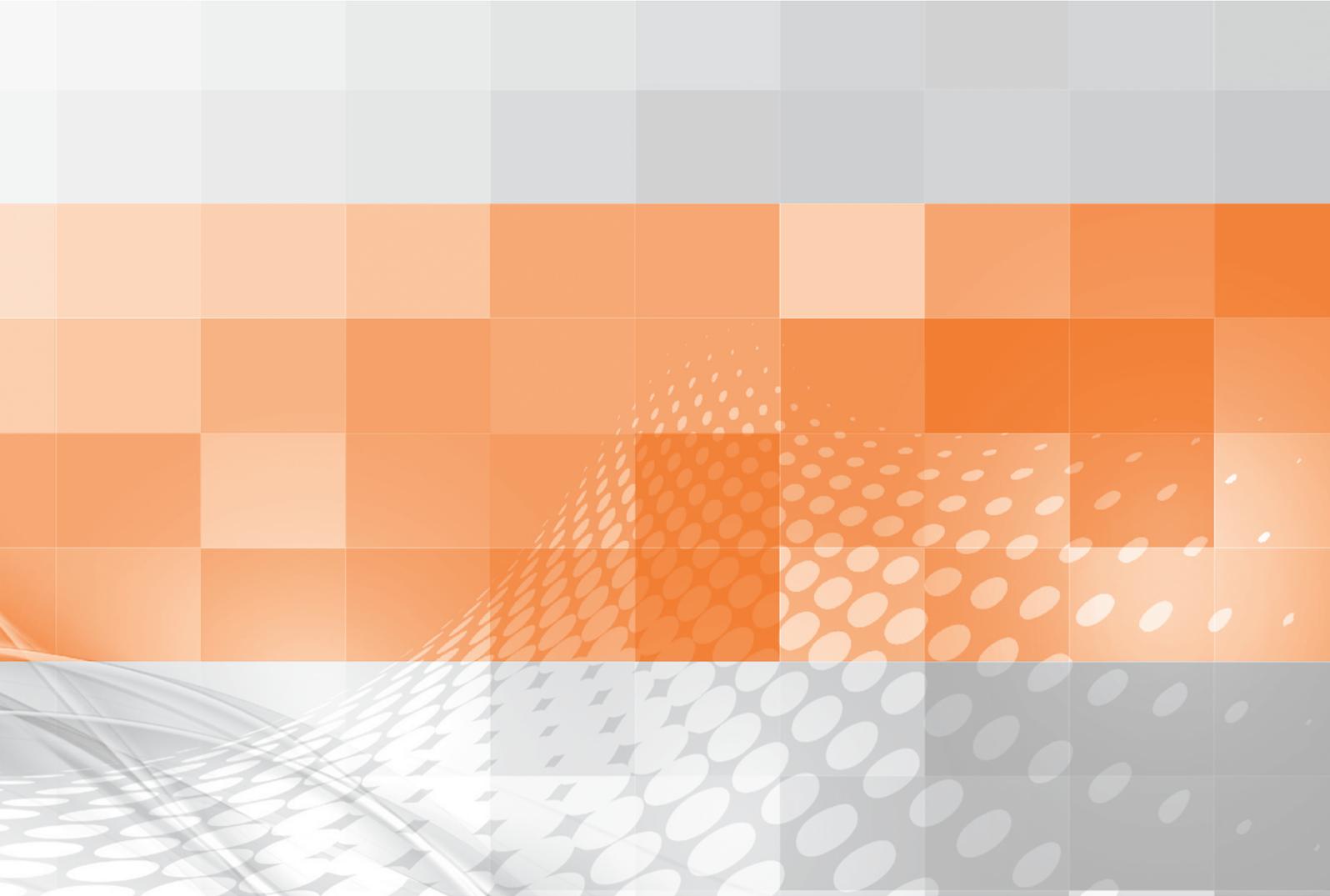
En conclusion, cette journée a été à l'évidence très et sans doute trop dense, un congrès d'une semaine aurait été préférable pour couvrir convenablement tous les sujets, et permettre des échanges plus approfondis.

Néanmoins, en rassemblant des spécialistes d'horizons divers, chercheurs académiques, industriels, associations, agences, cette journée aura permis de faire une synthèse des différentes expériences et analyses, de mettre en exergue plusieurs points saillants, pour suggérer des actions susceptibles de contribuer au développement des énergies renouvelables au service de l'humanité.

Nous allons donc nous efforcer de relayer les messages qui ont été passés aujourd'hui. Et au-delà des seuls intervenants de la journée, nous allons solliciter dès demain tous les spécialistes qui ont été présents, pour produire une contribution écrite, dont nous ferons une compilation sous forme d'un recueil.

Dans l'immédiat, je vous invite à prolonger cette journée d'étude en vous rendant à la cérémonie qui va débiter bientôt, à l'UNESCO.

Merci encore à nos organisateurs du CNRS, de l'ADEME et de l'UNESCO pour le travail réalisé, et à vous tous, Mesdames et Messieurs, pour votre participation à cette journée.



- II -

# Cérémonie anniversaire



## Marie Hélène AUBERT

Conseillère pour les négociations internationales climat et environnement du Président de la République.

Monsieur le Président, Mesdames, Messieurs. Tout d'abord, merci de l'honneur que vous me faites, d'ouvrir, après une riche journée de travaux, cette cérémonie dédiée au 40<sup>e</sup> anniversaire du congrès international « Le soleil au service de l'homme », qui s'est tenu sous l'égide de l'UNESCO à Paris en 1973.

Au moment où le GIEC publie la première partie de son cinquième rapport, dont les conclusions confirment l'accélération du réchauffement climatique et son origine humaine, elle vient à point nommé en rappelant que l'humanité a sans doute mieux à faire que de poursuivre sa fuite en avant minière, bénédiction ou calamité selon les contextes, pour assurer son accès durable à l'énergie.



Crédit photo: UNESCO

A vrai dire, les énergies renouvelables ne sont pas si nouvelles, et Phébus, Eole, ou Vulcain habitent les imaginaires des hommes et leurs rêves de puissance, comme la maîtrise des cours d'eau, depuis des siècles. Mais les années 70 et leurs deux chocs pétroliers ont clairement marqué un tournant dans la politique énergétique des pays industrialisés, qui ont voulu alors réduire leur dépendance aux importations d'hydrocarbures, sécuriser davantage leurs approvisionnements, et explorer des voies nouvelles. La France a ainsi fait le choix à ce moment-là de construire son parc électronucléaire, qui lui procure à l'heure actuelle 75 % environ de son électricité.

Depuis, le monde a considérablement changé, et aujourd'hui la croissance des pays émergents va de pair avec un insatiable appétit d'énergie... fossile essentiellement.

Ainsi en 2013, malgré les progrès indéniables des énergies renouvelables, les hydrocarbures dominant toujours très largement le paysage énergétique mondial, les Etats-Unis ont bouleversé la donne avec le boom des gaz de schiste, et le charbon, encore abondant et bon marché, revient même en force ! Nous sommes donc très loin de la trajectoire recommandée par les scientifiques du GIEC pour contenir l'élévation de la température du globe à 2 °C d'ici 2100, par rapport à la période préindustrielle. Sans parler de l'impact sur la santé de l'air pollué des grandes villes, devenues parfois irrespirables, et du creusement des inégalités, y compris en matière d'accès à l'énergie, entre les plus riches et les plus pauvres.

Ce n'est donc pas d'une simple évolution dont nous avons besoin, mais d'une véritable révolution énergétique, si nous voulons d'une part réduire notre dangereuse addiction au carbone, et d'autre part permettre aux 9 milliards d'habitants qui habiteront bientôt notre planète d'avoir tous accès à une énergie propre, à des coûts supportables.

C'est ce défi formidable que la France a décidé de relever, non seulement pour elle-même, mais aussi pour et avec l'Union européenne, pour et avec la communauté internationale.

C'est pourquoi elle a voulu accueillir en 2015 la 21<sup>e</sup> conférence sur le climat qui devra trouver l'accord global, ambitieux, engageant toutes les parties prenantes, indispensable pour maîtriser le changement climatique et réduire ses impacts.

Le Président de la République l'a confirmé lors de la dernière conférence environnementale : notre transition énergétique repose sur deux piliers essentiels, les économies d'énergie, avec un objectif ambitieux de réduction de 50 % de nos consommations à l'horizon 2050, et les énergies renouvelables, pour lesquelles la France doit combler son retard en vue d'atteindre l'objectif fixé de 23 % du mix énergétique en 2020.

Qu'est-ce qui nous permettra de franchir le cap nécessaire, en France comme ailleurs ?

Les leviers en sont connus :

- D'abord une révolution technologique : soutenir la recherche et l'innovation, valoriser les résultats les plus prometteurs, structurer les filières porteuses qui arriveront à maturité.
- Ensuite, la lisibilité et la stabilité du cadre réglementaire et législatif pour les acteurs économiques, dans un monde où la compétition économique est ouverte et vive.

- Troisièmement, la coordination et le pilotage dans le temps des dispositifs de soutien financier aux énergies renouvelables, afin d'éviter les « stop and go » ou les changements erratiques qui insécurisent investissements et filières naissantes.
- Enfin la régulation, d'abord au niveau européen, des marchés de l'énergie, la libéralisation tous azimuts ayant montré ses limites, et du carbone, aujourd'hui mal en point faute de gouvernance appropriée.

La France s'emploie à actionner ces différents leviers, et bon nombre d'annonces ont été faites récemment en ce sens par le Président de la République, le Premier Ministre, et le Ministre de l'Ecologie, du Développement durable, et de l'Energie. L'AFD pour sa part, consacre de plus en plus de moyens à l'essor des énergies renouvelables, comme par exemple en Afrique du Sud où se rendra prochainement le Président de la République.

Même si ce processus de mutation énergétique sera, nous le savons, long et complexe, il ne sera peut-être pas le plus difficile à conduire néanmoins.

Car la France ne peut réussir seule. Une étape décisive sera en effet de relancer le projet européen, et l'année 2014 s'y prête particulièrement bien, autour d'une véritable politique européenne commune de l'énergie. L'Union européenne est née d'abord, souvenons-nous, de la Communauté du charbon et de l'acier, alors que son avenir énergétique réside en grande partie aujourd'hui sur les forces du soleil, du vent, de l'eau, de la chaleur de la terre, et sur le renouvellement constant de la biomasse, bref sur les énergies renouvelables. Au-delà des discussions sur le paquet énergie-climat pour 2030, la communauté européenne de l'énergie, adaptée aux enjeux du 21<sup>e</sup> siècle, reste largement à construire. Mais la France est convaincue qu'il faut s'engager dans cette voie, comme le Président de la République l'a exprimé avec force lors des Conseils et sommets européens. De même, ce sont les coopérations régionales, au sens large, qui permettront de faire progresser les énergies renouvelables, dans le cadre notamment de l'initiative SE4All, que dirige à présent M. Kandeh Yumkella.

Ce n'est pas tout. La révolution démocratique et territoriale induite par la mutation énergétique, liée intrinsèquement à celle des modes de vie, constitue également une des clés du développement des énergies renouvelables : débattre avec tous les acteurs de l'économie et de la société, pour éclairer la décision politique sur le moyen et le long terme, créer un consensus national acceptable, décentraliser et territorialiser l'énergie en fonction des spécificités régionales ; voilà qui bouscule en particulier les structures historiques d'une France jacobine et centralisée. L'énergie solaire est sans doute de ce point de vue la plus « subversive », qui peut rendre les individus et les acteurs locaux beaucoup plus indépendants par rapport aux pouvoirs centraux,

quels qu'ils soient. Trouver le bon équilibre entre la créativité des territoires, les ressources inégales et l'équité assurée par les états centraux, au nom du bien commun, est rendu impératif par la force de dynamiques aujourd'hui plus horizontales que verticales, grâce en particulier à l'extraordinaire développement des réseaux d'information et de communication.

Enfin, la finance et la technique, certes nécessaires, ne suffiront pas à résoudre tous les problèmes. Nos sociétés interconnectées ont profondément évolué. Les sciences humaines et sociales devront aussi être mises à contribution, pour décrypter et utiliser le désir de liberté, d'autonomie, de diversité, de justice des individus et des sociétés, et tirer le meilleur parti des cultures et identités régionales, pour des réalisations déjà très créatives, comme en témoignent sous des angles différents le succès du Solar Decathlon, qui se tiendra à Versailles au printemps 2014, ou de l'opération « Lighting a billion lives » en Inde, menée par le TERI Institute.

Mesdames, Messieurs, la tâche est immense mais exaltante, et je veux rendre hommage ici aux pionniers qui ont permis de sortir les énergies renouvelables de la « niche » verte dans laquelle on les avait trop vite enfermées.

40 ans, c'est aussi le temps qui nous reste pour atteindre les objectifs fixés pour 2050, c'est dit-on l'âge de la maturité.

Mais à l'échelle de l'ère industrielle, les énergies renouvelables sont encore très jeunes. La thermodynamique et le moteur à explosion ont bouleversé le monde depuis deux siècles, portant la révolution industrielle pour le meilleur mais parfois pour le pire, sur le plan environnemental et social. Notre façon de produire et d'utiliser l'énergie illustre ou suscite en effet une certaine vision du monde. Utilisant ingénieusement l'abondance et la gratuité des éléments naturels qui sont notre bien commun, les énergies renouvelables peuvent contribuer à la réconciliation de l'homme avec sa biosphère, dans un monde plus sobre, plus intelligent, plus solidaire.

L'énergie la plus renouvelable restant encore celle immatérielle de l'imagination, de l'intelligence, et du sentiment d'une communauté de destin de l'humanité sur la planète qu'elle habite.

Je souhaite donc un très bel anniversaire aux énergies solaires et renouvelables, et que l'on parle désormais non plus des 30 années glorieuses du passé, mais des 40 lumineuses de l'avenir.

Je vous remercie.

## Gretchen KALONJI (transcription du discours prononcé) Sous-Directrice générale pour les sciences exactes et naturelles, UNESCO

**E**xcellences, chers collègues, mesdames et messieurs, laissez-moi tout d'abord vous souhaiter la bienvenue chez vous, ici à l'UNESCO. Je tiens par ailleurs à exprimer ma gratitude à l'ADEME, ainsi qu'au CNRS pour l'organisation de cet événement qui, comme vous l'avez entendu, célèbre le 40<sup>e</sup> anniversaire de la conférence de 1973 de l'UNESCO, avec un titre légèrement différent. À l'époque, cette conférence avait été intitulée « Le soleil au service de l'homme », mais celle d'aujourd'hui porte un nom peut-être plus approprié : « Les énergies renouvelables au service de l'humanité ». J'aimerais également adresser mes remerciements les plus sincères à la Délégation permanente de la France auprès de l'UNESCO pour son aide dans l'organisation de cette conférence et son soutien sans faille aux programmes scientifiques de l'UNESCO. Enfin, j'aimerais remercier les intervenants présents aujourd'hui, qui ont tous joué un rôle essentiel dans la sensibilisation de la communauté internationale aux énergies renouvelables.

La cérémonie de ce soir et les discussions scientifiques qui se sont déroulées tout au long de la journée tombent à point nommé. Du point de vue de la science à l'UNESCO, un ciblage plus efficace de la science et de l'ingénierie pour réduire plus efficacement la pauvreté énergétique est au cœur de l'initiative Énergie durable pour tous lancée par le Secrétaire général des Nations Unies. Je suis certaine que M. Yumkella, nous en parlera plus longuement tout à l'heure.



Crédit photo : ADEME

Je n'ai pas besoin de vous expliquer l'importance des énergies renouvelables pour le développement durable, mais je tiens à mettre en avant les rôles que l'UNESCO juge stratégiques. Comme un grand nombre d'entre vous le savent, notre organisation dispose d'un mandat dans les domaines de l'éducation,

la science et la culture. Les défis aux multiples facettes que nous a parfaitement décrits Marie-Hélène Aubert sont donc loin de nous être étrangers. Comme elle l'a également mentionné, en plus de l'éducation, de la science et de la culture, nous devons procéder à d'autres transformations essentielles pour une transition vers des systèmes énergétiques plus durables dans le monde entier. À l'échelle internationale, il apparaît évident que nous devons renforcer nos capacités de recherche interdisciplinaire et réduire les écarts entre les diverses régions du monde, notamment en renforçant les capacités des pays en développement. Ces actions doivent néanmoins être associées à des transformations de nos systèmes d'enseignement supérieur. À l'UNESCO, nous pensons que l'association de la recherche et de l'éducation, ainsi que la mise en œuvre de nouvelles méthodes d'intégration de problèmes interdisciplinaires liés au développement durable dans le programme des systèmes d'enseignement supérieur constituent une stratégie appropriée. Nous devons également imaginer des approches plus créatives pour rapprocher les sciences et la société. Le Secrétaire général des Nations Unies a récemment demandé à l'UNESCO de créer un conseil scientifique consultatif. Ces défis énergétiques figureront sans aucun doute parmi les sujets prioritaires traités par ce conseil.

Nous vous avons déjà parlé à deux reprises de 1973, mais le travail de l'UNESCO sur les énergies renouvelables a débuté bien en amont, près de 20 ans auparavant. Les premiers travaux ont commencé dans le cadre d'un programme international de recherche sur les zones arides, qui a débuté dans les années 50. Il a culminé avec le sommet sur les énergies solaire et éolienne en zone aride organisé à New Delhi en 1954. Comme dans de nombreuses régions du monde, les activités de l'UNESCO dans le domaine de l'énergie se sont renforcées dans les années 70, en raison des crises énergétiques mondiales. C'est dans ce contexte que la conférence de 1973 s'est déroulée. Encore une fois, l'objectif principal consistait à favoriser la collaboration internationale sur les sources d'énergie non traditionnelles et renouvelables, en particulier l'énergie solaire.

20 ans plus tard, l'UNESCO a poursuivi ses efforts avec la conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement. En 1993, elle a organisé une réunion d'experts de haut niveau qui ont étudié le potentiel de toutes les formes d'énergies renouvelables et leurs applications. Elle a ensuite initié un processus qui a abouti en 1996 au Sommet solaire mondial réunissant des chefs d'État et de gouvernement dans le but de définir un programme solaire international.

L'UNESCO a également permis la création du GREET, le programme mondial d'éducation et de formation en matière d'énergies renouvelables, qui est toujours actif et se concentre principalement sur l'Afrique et les difficultés liées au manque de compétences dans les régions utilisant les énergies renouvelables. Voici donc pour la partie historique. Je souhaiterais maintenant prendre deux minutes pour vous présenter nos travaux dans ce domaine et nos axes stratégiques.

Encore une fois, nous sommes très engagés dans la collaboration avec les États membres, notamment dans le monde en développement, sur le renforcement des capacités de recherche. Nous disposons de centres de recherche affiliés à l'UNESCO, appelés centres de recherches de catégorie 2, qui travaillent ensemble dans le monde entier, en collaboration avec les chaires de l'UNESCO dans ces domaines. Il s'agit de notre stratégie de mise en réseau de la communauté scientifique internationale. Un nouveau centre a été récemment mis en place à Marrakech. Ses travaux se concentrent sur les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique. Nous travaillons également avec les établissements d'enseignement supérieur et des réseaux, par exemple, l'African Network of Scientific and Technological Institutions, qui regroupe 130 établissements de recherche en Afrique. Nous travaillons aussi en étroite collaboration avec les ministères de nos États membres.

Nous essayons d'intégrer les énergies renouvelables dans nos collaborations avec les États membres portant sur la création de parcs scientifiques et d'incubateurs technologiques, qui constituent un autre aspect important du programme de l'UNESCO. Par ailleurs, nous avons à notre disposition les immenses ressources des sites de l'UNESCO inscrits au patrimoine mondial. Ils comptent environ 700 sites naturels et 680 biosphères, mais aussi des géoparcs émergents et des sites RAMSAR. Je pense que ces sites représentent environ 15 % des zones protégées dans le monde. Nous pouvons donc les utiliser comme des laboratoires vivants pour les initiatives de développement durable et d'énergies renouvelables.

Enfin, nous participons aux travaux d'ONU-Énergie, notamment en matière d'éducation et de renforcement de la capacité de recherche. Encore une fois, la science est au cœur de toutes les activités de l'UNESCO. Nous nous appuyons sur des réseaux très complets, les commissions nationales de nos États membres, ainsi que nos comités nationaux pour les différents programmes scientifiques intergouvernementaux. Mais nous faisons également de plus en plus appel au secteur privé et à la société civile.

Je sais que vous êtes nombreux ici à avoir déjà travaillé avec l'UNESCO sur des sujets liés à l'énergie ou d'autres domaines. Sachez que nous souhaitons vivement renforcer nos partenariats dans ces domaines.

Je vous remercie de votre présence.

## Jean-Yves MARZIN

*Directeur de l'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes (CNRS)*

Bonsoir Mesdames et Messieurs. Alain Fuchs, président du CNRS, ne pouvait être présent ce soir et vous prie de l'excuser. Je peux toutefois vous assurer du grand intérêt qu'il porte à l'évènement d'aujourd'hui, aux messages qui ont été, ou seront délivrés, ainsi qu'aux initiatives ou actions qui pourraient en découler.

Je tiens à remercier tout particulièrement Mme Marie-Hélène Aubert, Conseillère pour les négociations internationales climat et environnement du Président de la République, pour sa présence ici ce soir, pour son intervention, et pour le soutien qu'elle a apporté à cette manifestation.

Cette manifestation est organisée, comme cela a été rappelé, à l'occasion du 40ème anniversaire du colloque «Le soleil au service de l'homme» qui s'était déjà tenu à l'UNESCO en 1973, et qui avait réuni 1000 participants de 60 pays. Le CNRS, l'ADEME et l'UNESCO ont pensé qu'une initiative de cette nature devait à l'évidence désormais être étendue au-delà des seules énergies solaires. En effet, c'est l'ensemble des énergies renouvelables qui va contribuer à la réduction

de nos émissions de gaz à effet de serre, à côté, bien-entendu, de l'amélioration de l'efficacité énergétique et de la modération de notre consommation d'énergie. Ce sont également les énergies renouvelables dans leur ensemble qui sont susceptibles de participer à un meilleur accès à l'énergie pour tous. Nos trois agences partagent sensiblement la même vision des enjeux autour du développement des énergies renouvelables, développement auquel ils contribuent depuis longtemps par les actions qui leur sont propres. Nous nous sommes donc très naturellement impliqués ensemble pour organiser aujourd'hui deux manifestations successives :

- la journée d'étude internationale qui s'est tenue tout à l'heure au siège du CNRS et qui a rassemblé environ 200 participants, spécialistes et acteurs des énergies renouvelables, pour discuter de l'état et des perspectives des différentes filières des énergies renouvelables.
- cette cérémonie organisée symboliquement dans les locaux de l'UNESCO, qui marque l'importance de cette journée « anniversaire ».

Je commencerai par une brève synthèse sur la journée d'étude.

Ce ne sont pas moins de 28 intervenants d'une dizaine de pays, qui ont réussi l'exploit, et le mot n'est pas trop fort, de dérouler un panorama aussi exhaustif que possible du développement des énergies renouvelables. C'était un exploit car chacun disposait de seulement 10 minutes pour présenter un domaine ou une problématique. Il y eu d'abord des présentations générales sur le bilan du développement des énergies renouvelables dans le monde et leurs perspectives. Les différentes filières ont ensuite été passées en revue. Puis, une session s'est attachée aux aspects transversaux qui constituent des freins au développement des énergies renouvelables. Enfin, la dernière session a été consacrée aux moyens à mettre en œuvre pour permettre un accès à l'énergie pour tous dans les pays en développement.



Crédit photo © Jean-José Wanegue

On peut retenir quelques messages forts de ce colloque :

- tout d'abord la confirmation des progrès technologiques et économiques réalisés dans les différentes filières. Toutes néanmoins doivent encore se nourrir de programmes de recherche et développement ambitieux pour créer les ruptures qui demeurent nécessaires, qu'il s'agisse de faire baisser les coûts, de gérer l'intermittence ou la variabilité à travers des solutions de stockage massif et des réseaux intelligents, de préserver les ressources rares ou de réduire l'impact environnemental.
- le deuxième est la nécessité d'avoir des politiques publiques appropriées et stables, garantissant un essor harmonieux et économiquement viable des différentes filières. Pour cela, une stratégie sur le long terme, mieux coordonnée à toutes les échelles: régionales, nationales et mondiale semble indispensable. Il est apparu très clairement que les filières énergies renouvelables avaient

toutes encore besoin, à des degrés divers, de soutiens publics pour leur développement, même si les formes de soutien peuvent - ou doivent dans certains cas- être adaptées.

- Enfin, la nécessité de construire une transition énergétique vers une utilisation massive des ressources renouvelables en prenant en compte les dimensions sociétale et internationale. A cet égard, même si beaucoup de chemin reste à parcourir, on peut saluer les initiatives internationales mises en œuvre depuis quelques années en particulier, l'initiative SE4All des Nations Unies. M. Kandeh Yumkella, notre grand témoin ce soir, représentant spécial du Secrétaire général de l'ONU nous en dira plus. On peut également citer d'autres acteurs très actifs en matière de transition énergétique dans les pays en développement, l'Union européenne qui a d'ailleurs annoncé une contribution exceptionnelle de 465 millions d'euros dans le cadre de l'initiative SE4All, l'Association Méditerranéenne des Agences Nationales de maîtrise de l'énergie (MEDENER) et bien-sûr la France, avec notamment les actions du Ministère des Affaires étrangères et du Développement international, de l'AFD, de l'ADEME et du Fonds français pour l'environnement mondial.

Plusieurs cibles, objectifs et mesures dans ces différents domaines particulièrement importants pour le futur des énergies renouvelables ont été actés dans les Grenelle de l'Environnement, ou récemment annoncé, comme cela a été rappelé par Madame Aubert, par le Président de la République au cours de la 2<sup>e</sup> conférence environnementale les 20 et 21 septembre derniers.

Avant de conclure, j'aimerais remercier les personnes du CNRS, de l'UNESCO et de l'ADEME qui se sont impliquées fortement dans l'organisation de ces deux événements. Je remercie tout particulièrement pour le CNRS: Daniel Lincot, qui fut pour nous l'initiateur de l'évènement d'aujourd'hui, Alain Dollet qui a supervisé l'organisation, toujours assisté efficacement par Romie Lopez, Jean-Louis Buscaylet et Brigitte Perucca de la direction de la communication et leurs proches collaborateurs. J'exprime également notre reconnaissance à Dominique Campana, Marie D'Adesky et leurs collaborateurs de l'ADEME qui ont fourni un travail considérable et sans qui cet évènement n'aurait pu être organisé. Je terminerai évidemment en remerciant Osman Benchikh, dont l'engagement était une condition sine qua non pour que nous puissions nous lancer dans cette entreprise.

Je terminerai mon intervention en soulignant qu'il faudra bien-sûr poursuivre la dynamique amorcée aujourd'hui par d'autres actions concrètes dans les mois à venir, et nous nous y attacherons

Je vous remercie, Mesdames et Messieurs, pour votre attention.

## Bruno LECHEVIN

Président de l'ADEME

C'est bien entendu avec une certaine émotion que l'on se réunit 40 ans après ce qui a été un évènement fondateur pour le développement des énergies renouvelables dans une optique mondiale. 1973 a été une année mouvementée et productive : choc pétrolier, rapport du Club de Rome, création de l'AIE en réponse au cartel de l'OPEP, et création de l'agence pour les économies d'énergie, l'un des ancêtres de l'ADEME.

40 ans après, on se souvient encore des slogans : « la chasse au gaspi », « En France, on n'a pas de pétrole mais on a des idées ». Quelques années plus tard était créé le COMES (Commissariat à l'énergie solaire), lui aussi ancêtre de l'ADEME.

Ces évocations sont aussi un peu tristes penseront certains en confrontant les quelques résultats actuels aux ambitions initiales.

Certes, en 40 ans, la production d'énergies renouvelables a été multipliée par 2,3 mais vu l'augmentation de la production globale d'énergie sur la même période, le pourcentage d'énergies renouvelables est resté quasi stable, restant à une douzaine de pourcents.

Pour ma part, je souhaiterais plutôt me réjouir de ce qui a pu être accompli et quant à ce qu'il ne l'a pas été, tenter d'en tirer des leçons pour l'avenir tout en restant bien humble par rapport à nos capacités à modifier certaines trajectoires.

Tout d'abord, citons quelques raisons d'espérer :

Qui aurait pu penser qu'alors que nous arrêtions la centrale Thémis en 1986 jugée alors « définitivement non compétitive » - ce qui reste un épisode douloureux pour ceux qui avaient réussi un véritable défi technologique - que nous atteindrons aujourd'hui, en France, un mix électrique comprenant en moyenne 2,7 % d'éolien voire jusqu'à 6 % d'énergie solaire ?

Bien sûr, cela ne s'est pas fait sans à-coups, sans actions défensives brutales de certaines filières conventionnelles, sans attermoiement politique ou réglementaire mais cela s'est fait : les énergies renouvelables sont sorties de la marginalité. Et ceci, grâce aussi à la mobilisation des acteurs associatifs, de la société civile, de chercheurs et d'industriels.

Certains problèmes que nous avons à résoudre aujourd'hui, telle la stabilité des réseaux électriques ultramarins quand en pointe on y intègre plus de 30 % d'énergie solaire ne sont-ils pas justement une preuve de réussite du développement des énergies renouvelables ?

Plusieurs décennies de recherche permettent aujourd'hui de nourrir des développements technologiques de grande ampleur comme ceux

portés par le plan des investissements d'avenir dont 2,3 milliards ont déjà été confiés à l'ADEME. Le lancement avant-hier d'un nouvel appel à manifestations d'intérêt sur les fermes hydroliennes en est une illustration : le développement des fermes hydroliennes s'appuie sur les technologies développées dès 1966, avec l'exploitation de l'énergie marémotrice pour le barrage et le générateur électrique de la Rance.

Au niveau mondial, malgré le manque de pérennité des politiques publiques et l'instabilité des cadres réglementaires, puissants freins qui découragent les investissements, ce sont quelques 100 Mégawatts de photovoltaïque qui sont installés chaque jour et près de la moitié des capacités électriques ajoutées annuellement sont issues d'énergies renouvelables, là encore au niveau mondial.



Credit photo : UNESCO

Certes tout n'est pas rose, loin de là. Mais, sans faire preuve de nostalgie excessive, ne faudrait-il pas déjà que nous retrouvions le pouvoir d'enthousiasme des générations précédentes et leur esprit conquérant et humaniste ?

C'est d'autant plus essentiel que l'avenir tel que nous souhaitons l'envisager, fera de chaque citoyen un acteur de sa consommation énergétique, tantôt consommateur, tantôt producteur, tantôt auto-consommateur voire même effaceur. Au-delà des avancées technologiques nécessaires (réseaux intelligents, compteurs communicants...), impliquer nos concitoyens nécessitera de les ré-enchanter vis-à-vis de l'énergie : à la fois par rapport à une vision d'un futur désirable mais aussi par la conscience des liens entre cette vision et son action personnelle quotidienne.

Un avenir désirable et soutenable, c'est ce que nous avons tenté de mettre en lumière à travers nos scénarios 2030-2050. L'ADEME a réalisé un exercice prospectif, « visions 2030-2050 », permettant d'identifier une voie vers le Facteur 4. J'insiste, une voie et non la voie car nous savons tous que d'ici ces échéances, divers aléas se produiront. Néanmoins, l'essentiel a été de montrer qu'il était possible d'atteindre ce Facteur 4, en diminuant par 2 notre consommation d'énergie et en développant fortement les énergies renouvelables. Le socle de ces évolutions est l'indispensable couplage de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables ; les énergies renouvelables seront d'autant plus aptes à répondre à la demande que celle-ci aura été conjointement réduite.

Nous avons également et surtout montré, qu'il ne s'agissait pas d'un modèle de décroissance mais au contraire d'une autre forme de croissance, plus sobre et plus solidaire. Bien sûr pour atteindre nos objectifs, nous avons à relever de nombreux défis, lever diverses barrières, depuis le développement des technologies de stockage jusqu'à la recherche des bons réglages réglementaires ou fiscaux, en passant par une meilleure mobilisation de la biomasse. C'est de notre responsabilité de continuer à aller de l'avant, de ne rien lâcher :

- Parce que c'est indispensable : la raréfaction et donc, le renchérissement des énergies non renouvelables, sont inéluctables et ce, quels que soient les soubresauts liés à la découverte de tels ou tels gisements nouveaux.
- Mais aussi parce que c'est souhaitable. Contrairement aux ressources conventionnelles ultra-concentrées et aux déséquilibres qui résultent de cette manne financière, les potentiels d'énergies renouvelables sont répartis bien plus équitablement à travers le monde.

J'ai un regret, et c'est à la fois le président de l'ADEME et le membre fondateur d'Electriciens Sans Frontières qui parlent : que les énergies renouvelables ne contribuent pas encore suffisamment aux besoins des pays en développement. Ce doit être notre objectif.

Au niveau mondial, les investissements dans le secteur des énergies renouvelables ont été multipliés par 6,5 entre 2004 et 2011. Par ailleurs, les énergies renouvelables représentaient en 2012 plus de 5,7 millions d'emplois.

Les secteurs de l'éolien, de la biomasse et du photovoltaïque connaissent ainsi une croissance spectaculaire. À ce stade, ce sont surtout l'Union européenne, les pays développés et les grands émergents qui sont concernés. Moins de 7 % de cette croissance a profité aux pays en développement et malgré un potentiel très important en énergies renouvelables, l'Afrique en a très peu profité. Nous avons multiplié les coopérations, fait se succéder divers plans et nous plaçons sincèrement beaucoup d'espoir dans les dernières avancées en date, qu'il s'agisse du plan solaire méditerranéen, de l'initiative des Nations Unies « Energie durable pour tous » ou encore de la montée en puissance de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables, l'IRENA.

Certes, au total, le compte n'y est pas. Nous n'avons pas réalisé le rêve de nos prédécesseurs du solaire pour tous... du moins, nous ne l'avons pas encore réalisé...

Et pourtant, en raisonnant un peu plus globalement, nous avons plein de bonnes raisons environnementales, économiques ou politiques de le faire : développer nos entreprises, créer de l'emploi, limiter les conflits régionaux, stabiliser les populations, palier le renchérissement inéluctable des énergies fossiles, etc. et bien entendu lutter contre les dérèglements climatiques.

Mais au-delà de ces arguments rationnels, c'est aussi et simplement par solidarité, par humanité qu'il faut le faire : l'énergie est un bien essentiel, et ses marchés ne peuvent, ici comme ailleurs, se résumer à de seuls marchés financiarisés. L'énergie est indispensable à l'accès au développement, à l'éducation et à la santé. Mettre à disposition de tous une énergie renouvelable, accessible et peu impactante sur l'environnement est sans doute l'un de plus grands et des plus beaux défis que nous offre le XXI<sup>e</sup> siècle.

## Wolfgang PALZ

Président du Conseil Mondial des Energies Renouvelables

**B**onsoir à toutes et à tous. Pour moi-même et pour de nombreux collègues de longue date que je vois dans la salle, aujourd'hui est un grand jour.

Lorsque nous avons organisé la conférence « Le soleil au service de l'homme » il y a 40 ans, c'était un événement. À cette époque, l'idée est venue d'une poignée de pionniers Français de l'énergie solaire. J'insiste sur leur nationalité, car la France a toujours manifesté un vif intérêt pour l'utilisation de l'énergie solaire à des fins pratiques.

Qui étions-nous en 1973 ? Juste quelques scientifiques avec des idées. Nous n'avions rien à montrer, pas de gigawatts installés, même pas de mégawatts... Nous partions vraiment de zéro. Et qui nous a accueillis pour tenir ce congrès ? L'UNESCO. Je lui suis d'ailleurs très reconnaissant de s'être engagée aujourd'hui en partenariat avec l'ADEME et le CNRS, pour organiser cette conférence passionnante. Et vous conviendrez avec moi que le cadre est magnifique.



Credit: photo © ADEME

Parlons maintenant un peu des résultats que nous avons obtenus. Comme je le disais, le secteur des énergies renouvelables mondial était inexistant il y a 40 ans. Qu'avons-nous fait depuis et quel bilan pouvons-nous présenter ? Je vais vous parler en particulier du photovoltaïque et de l'éolien. Pour la seule année 2013, nous avons enrichi la capacité mondiale de production d'énergie photovoltaïque et éolienne de 85 GW. Nous avons cumulé 450 GW (320 dans l'éolien et 130 dans le photovoltaïque) depuis 1995. Cette année, le photovoltaïque et l'éolien ont bénéficié de 140 milliards d'euros d'investissements (il y a également eu des investissements dans d'autres sources d'énergie dont la biomasse et l'hydroélectrique). Ces deux sources d'énergie ont cumulé plus de mille milliards d'euros d'investissements au cours des dernières années.

Il y a quelque temps, la Commission européenne a estimé que cela constituait une révolution industrielle. Pour le moment, nous ne parlons pas de prévisions, mais bien de résultats concrets. Le secteur représente également plus de 2 millions d'emplois.

Les énergies renouvelables ont leur place dans le secteur énergétique de demain. Tout d'abord, l'électricité issue de sources renouvelables s'inscrit dans la lignée d'une politique environnementale de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Deuxième point, très important, elle nous permet de renforcer notre indépendance énergétique. Elle favorise également l'approvisionnement décentralisé en électricité des consommateurs et stimule l'économie grâce à la création d'emplois. Par ailleurs, il existe de nombreux arguments en faveur d'une politique énergétique rationnelle. Les centrales électriques de dernière génération exploitant des sources d'énergie renouvelables sont désormais souvent compétitives en termes de coût comparé aux centrales nucléaires et centrales à charbon. Je parle des nouvelles centrales, pas de celles qui sont déjà amorties. Elles sont tout simplement moins chères.

### Perspectives à l'horizon 2030

La capacité électrique mondiale actuelle est de 5000 GW. En procédant à une extrapolation à partir des 85 GW de capacités éolienne et photovoltaïque de cette année (les chiffres étaient équivalents l'année dernière), on peut estimer que la capacité cumulée avoisinera les 2000 GW d'ici 2030. Cela représente une augmentation considérable par rapport aux 5000 GW dont nous disposons aujourd'hui (toutes énergies confondues : nucléaire, charbon, pétrole, etc.). Bloomberg New Energy Finance, expert reconnu dans le domaine, prévoit 3500 GW supplémentaires issus des énergies renouvelables (toutes sources confondues) en 2030, soit 70 % des capacités additionnelles.

### Perspectives européennes

Nous avons un cadre légal pour 2020. En effet, dans le cadre du paquet climat-énergie européens nous avons un objectif contraignant en matière d'énergies renouvelables, faire passer la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique européen à 20 % à l'horizon 2020. Quelle capacité cela représentera-t-il ? Nous ne serons pas à 20 %, mais à 35 %. En effet la capacité de production d'énergie issue de sources renouvelables en Europe s'établit déjà à 22 % aujourd'hui. Les objectifs fixés ont été acceptés par tous les États membres pour l'éolien, le photovoltaïque, la bioénergie, etc.

Ce qu'il faut retenir aujourd'hui, c'est que l'Europe, qui a été leader du déploiement des énergies renouvelables ces 15 dernières années, est en train de perdre du terrain. Le leadership mondial est désormais assuré par l'Asie (Chine, Japon...) et certaines économies émergentes. La solution : plus d'auto-consommation et moins de politique. Tout le monde devient son propre fournisseur d'électricité.

### **Énergie solaire pour les populations pauvres des pays en développement**

Situation actuelle : 1,3 milliard de personnes n'ont pas accès à l'éclairage électrique aujourd'hui. Elles brûlent des milliards de litres de kérosène et des millions de tonnes de bougies pour un coût annuel de 30 milliards de dollars. Les fonds sont là, mais ils ne sont pas dépensés à bon escient. Avec toutes les baisses de prix observées au cours des dernières années, une lanterne solaire ne coûte aujourd'hui pas plus cher qu'un paquet de cigarettes. Alors pourquoi ne fait-on pas ce qu'il y a à faire ?

### **Énergies renouvelables à l'horizon 2050**

Je suis très heureux de la présence d'Harry Lehmann, directeur du Umwelt Bundesamt allemand. C'est un fervent défenseur d'une production basée entièrement sur des sources renouvelables d'ici 2050. Il a réalisé toutes les études détaillées pour l'Allemagne et le Japon notamment et il est convaincu que cet objectif est réalisable à l'échelle mondiale. C'est pourquoi j'ai insisté sur la situation à l'horizon 2030. Si nous poursuivons sur notre lancée, nous n'avons pas besoin d'une autre révolution. Il suffit de maintenir le rythme de déploiement que nous avons connu cette année. De cette manière, nous atteindrons 100 % d'énergies renouvelables en 2050. Il n'y a pas d'alternative. Unissons nos forces et faisons passer le message : nous nous sommes fixé un nouvel objectif qui vaut la peine de fournir des efforts, car il profitera à toute l'humanité. Le soleil est notre avenir.

Je vous remercie de votre attention.

### **Kandeh K. YUMKELLA** (transcription du discours prononcé)

*Représentant spécial du Secrétaire Général des Nations Unies et Chef exécutif de l'initiative Énergie durable pour tous, Sous-Secrétaire Général des Nations Unies*

**E**xcellences, chers participants, mesdames et messieurs. Je tiens à vous remercier de votre invitation. Je suis heureux de voir que Brice Lalonde et certains de mes bons amis de REN21 et Citi Bank sont présents.

Jim Yong Kim ont uni leurs efforts pour inciter les parties prenantes à opérer une véritable révolution énergétique. Il est tout à fait possible d'atteindre une production électrique alimentée à 100 % par les énergies renouvelables, mais nous craignons que le rythme et l'envergure du déploiement de ces technologies ne soient pas suffisants pour nous permettre d'atteindre les trois objectifs que nous nous sommes fixés.

Tout d'abord, il n'est pas acceptable qu'aujourd'hui encore, les besoins énergétiques primaires de 2,8 milliards de personnes dépendent des biomasses traditionnelles. La semaine dernière, nous avons d'ailleurs participé à un événement à New York avec Mme Hillary Clinton à ce sujet. Nous savons aujourd'hui que la pollution de l'air intérieur entraîne chaque année 4 millions de décès prématurés, dont 70 à 80 % de femmes et d'enfants. Cela représente le double de la mortalité liée au VIH/SIDA et au paludisme réunis. Et toutes les estimations prévoient une augmentation de ces chiffres en raison du manque d'accès à l'énergie. Cette situation est intolérable au 21<sup>e</sup> siècle. Nous avons donc besoin d'un déploiement rapide et d'envergure des énergies renouvelables pour faire de cette révolution énergétique une réalité.

Nous savons également que l'énergie est indispensable au développement économique, et que sans développement économique, la paix et la stabilité mondiales sont illusoire.



Crédit photo : Jean-José Wangue

Nous avons tellement parlé de l'initiative « Énergie durable pour tous » que vous devez très certainement connaître le sujet sur le bout des doigts. En quelques mots, le Secrétaire général des Nations Unies, Ban Ki-moon et le Président de la Banque mondiale,

Les peuples ont besoin d'opportunités, d'emplois et d'espoir. Mais si le reste du monde décide de produire et d'utiliser l'énergie comme nous le faisons depuis 150 ans, nous allons droit à la catastrophe climatique. Comment pouvons-nous assurer le développement et la prospérité du monde tout en limitant le réchauffement climatique à 2 °C ? Nous ne pouvons pas dire aux autres « Ralentissez votre croissance et votre développement alors que nous allons continuer à vivre comme nous le faisons depuis 150 ans ». Ce ne serait ni juste, ni équitable. D'ailleurs, c'était là l'objectif de Brice Lalonde : essayer d'obtenir un consensus sur le développement durable lors du Sommet de Rio+20, pour que chacun dans le monde puisse prétendre à la prospérité, à la paix et à la stabilité. Nous ne pouvons pas dire aux autres « Consommez moins, ralentissez, utilisez d'autres technologies. De notre côté, nous ne changerons rien ». Les études montrent que la planète se réchauffe. Comment pouvons-nous gérer la pauvreté énergétique de manière à assurer un développement durable ? Dans ce contexte, comment pouvons-nous œuvrer pour la prospérité du monde ? Et enfin, comment pouvons-nous limiter le réchauffement climatique au seuil 2 °C ? C'est là notre objectif. Et c'est pourquoi le Secrétaire général des Nations Unies et le Président de la Banque mondiale estiment que nous devons aller plus loin. Nous avons besoin d'une révolution énergétique pour atteindre les trois objectifs suivants d'ici 2030 : l'accès universel à des services énergétiques modernes, le doublement du taux mondial d'efficacité énergétique et le doublement de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique mondial.

Des partenariats durables seront la clé d'une énergie durable pour tous. C'est pourquoi notre initiative Énergie durable pour tous constitue ce que nous appelons un méga-partenariat ou une méga coalition créative. Nous avons toujours intégré des PDG d'entreprises privées, des chefs de gouvernements et des leaders de la société civile. Je vais vous citer un exemple : d'après l'AIE, l'accès universel à des services énergétiques modernes nécessiterait un investissement de l'ordre de 50 milliards de dollars par an. Aujourd'hui, l'aide publique au développement (APD) pour l'accès à l'énergie s'élève à près de 9 milliards de dollars par an. Comment trouver les 41 milliards manquants ? La réponse est simple : nous avons besoin d'investissements privés. Pas sous forme de subventions, mais d'investissements associés à des financements publics. J'ai besoin de mes amis de la Citi Bank et des grandes banques françaises. Il s'agit de mettre en place un modèle d'investissement et non un modèle de subvention. Cela signifie établir des partenariats qui garantiront que l'investissement et la technologie pourront être mis en œuvre. Nous avons besoin qu'EDF, Total, General Electric, Escom et d'autres discutent avec les responsables politiques. Nous voulons créer des marchés et des mesures incitatives pour le déploiement des technologies et pour l'accès universel à l'énergie. Mais comment

pouvons-nous créer une politique publique stable sur le long terme qui favorisera les investissements dans le secteur énergétique pour permettre sa transformation ? Lorsque je parle à des hommes d'affaires, ils me disent : « M. Yumkella, nous savons que les droits des personnes et l'accès à l'énergie sont en jeu, mais cela ne convainc pas mes actionnaires. » C'est pourquoi nous devons mettre sur pied un business model qui permette des investissements et un déploiement d'envergure. Pour réduire la pauvreté, vous devez transformer la productivité, augmenter les revenus et disposer d'énergie pour l'utiliser de manière productive. Bien évidemment, les personnes pauvres souhaitent vivre dans la dignité, percevoir des revenus et améliorer leur niveau de vie. Pour cela, il est essentiel de mettre en place des modèles d'investissement.

Je viens de vous détailler les trois éléments de base nécessaire à l'accès universel à l'énergie et je vais à présent détailler les moyens d'atteindre les trois objectifs.

Des politiques appropriées doivent être mise en place dans tous les pays. Les politiques sont en effet un point sensible et important dans le secteur énergétique. Aux Nations Unies, et Brice Lalonde vous le confirmera, nous avons mis 20 ans pour parvenir à discuter de manière intelligente de l'énergie.

Oui, nous sommes parvenus à convaincre l'Assemblée Générale de proclamer l'année 2012 « Année de l'énergie durable » mais également de proclamer la Décennie de l'énergie durable pour tous (2014-2024). Cette initiative signifie que nos diplomates et les nations se sont engagés à prêter une attention particulière à l'énergie pendant 10 ans à compter du 1er janvier 2014. Le Secrétaire général a d'ailleurs affirmé que l'énergie était le lien qui unissait tous les piliers du développement durable. Pour faire fonctionner les hôpitaux, pour mettre en place un système éducatif dans les pays pauvres et pour obtenir de l'eau potable, nous avons besoin d'énergie. L'énergie est essentielle au développement durable. Voici le message du Secrétaire général. C'est pour cette raison que nous avons uni nos forces, pour que l'énergie soit considérée comme un pilier du développement durable.

Dans un deuxième temps, nous avons besoin de politiques publiques. Wolfgang Palz vient d'en parler, des politiques stables sur le long terme sont essentielles. Nous devons faire pour le secteur de l'énergie ce que nous avons fait pour le secteur de la téléphonie mobile. Lorsque la politique émet un signal clair et que les investisseurs ont une visibilité de long terme, ils n'hésitent pas à s'engager. À titre d'exemple, l'Afrique comptait en 2000 environ 300 à 400 téléphones mobiles connectés au réseau. En 2012, ce chiffre est passé à 720 millions grâce à une politique publique stable. L'Afrique est ainsi devenue le deuxième marché mondial de la téléphonie derrière l'Asie.

Ces politiques ne prévoient aucune subvention, les investissements sont réels, et les technologies évoluent. D'après les chiffres donnés par Wolfgang, environ 244 milliards de dollars ont été investis dans les énergies renouvelables en 2012, la moitié provenant des pays en développement. Ces pays évoluent rapidement et souhaitent accéder à ces technologies d'énergies renouvelables.

Nous avons également besoin de partenariats public-privé, comme dans le secteur des infrastructures. Nous avons besoin que les gouvernements travaillent avec les entreprises qui disposent des technologies et des financements. C'est pour cette raison que l'initiative Énergie durable pour tous regroupe de nombreux hommes d'affaires, ministres et présidents qui, avec le Secrétaire général, étudient les obstacles que nous pouvons lever pour attirer les capitaux et technologies privés et les mesures incitatives qui permettraient de stimuler la R&D. D'après Bill Gates, nous avons besoin de miracles énergétiques. Il n'est pas convaincu que les technologies dont nous disposons aujourd'hui permettront de répondre à la demande croissante en énergie et de maîtriser le réchauffement climatique. Il parle ainsi de miracles énergétiques et de la nécessité de renforcer la R&D pour mettre au point des technologies révolutionnaires. Il souhaite faire pour l'énergie ce qu'il a fait pour le paludisme, la tuberculose et le VIH/SIDA. Il investit dans la recherche et le développement pour rendre l'énergie solaire encore meilleur marché. Les consommateurs pourront ainsi devenir producteurs en installant des panneaux solaires sur leur toit et alimenter à leur tour le réseau. Mais comme l'a expliqué Wolfgang Palz, nous devons disposer de systèmes de stockage et de transmission, mais également de technologies permettant de résoudre le problème de l'intermittence de cette énergie. Il est donc nécessaire de développer la R&D.

Enfin, nous devons concentrer également les efforts sur les tarifs de l'énergie. Soyons honnêtes : les entreprises réagissent au signal-prix. Nous devons trouver des moyens intelligents de soutenir l'innovation.

Si j'utilise le terme « subvention », je m'attirerai les foudres des économistes. Je dis simplement qu'il faut faire pour les énergies renouvelables ce qui a été fait dans d'autres secteurs.

Pour conclure, je dirais que nous devons impérativement gagner en efficacité. Nous devons conjuguer déploiement rapide, à grande échelle et partenariats durables. Pour que cela fonctionne, les politiques doivent être adaptées. Pour changer le monde en 20 ans, vous devez prendre des décisions dès maintenant. Toutefois, cela reste difficile d'un point de vue politique dans un certain nombre de pays, même dans les pays pauvres d'Afrique. Pourquoi ? Prenons par exemple les prix. Essayez de convaincre un gouvernement quel qu'il soit d'augmenter le prix de l'énergie. La population était habituée à la gratuité. Essayez de convaincre un pays qu'il doit payer un peu plus cher pour disposer d'eau potable. Des politiques publiques à long terme qui donnent aux marchés confiance et stabilité, des partenariats public-privé et des prix adaptés doivent être mis en place. Nous devons taxer le carbone pour faire pour le secteur de l'énergie ce que nous avons fait dans d'autres secteurs et nous concentrer sur le long terme. Il ne s'agit pas de trouver une solution à la va-vite. L'initiative Énergie durable pour tous n'est pas un programme de vaccination dans lequel vous donnez de l'argent et nous distribuons des vaccins le lendemain. Nous parlons ici d'investissements. Nous avons besoin que vous participiez tous à cette révolution. Si vous y croyez, aidez-nous à lui donner vie, à convaincre les gouvernements. Pour faire ce qui est juste, mettons les hommes d'affaires autour de la table. Faisons de ce monde un monde meilleur. Mes petits-enfants en Afrique ont le droit de connaître la croissance et la prospérité. Cette initiative n'est pas destinée à notre génération, mais à la génération suivante. L'accès à l'énergie pour tous est la question qu'il faut se poser au 21<sup>e</sup> siècle, l'énergie étant au cœur d'une croissance économique inclusive et durable.

Je vous remercie de votre attention.

## Brice LALONDE

*Conseiller spécial pour le développement durable auprès du Pacte Mondial des Nations Unies*

Mesdames et Messieurs, c'est bon de se retrouver dans cette salle, de revoir de vieilles connaissances et d'évoquer le chemin parcouru par les pionniers des énergies renouvelables. Mais ce qui est important, c'est de souligner leur ténacité. Parce que le monde d'aujourd'hui est tourné vers le court terme. Les élections ont lieu tous les quatre ou cinq ans et la plupart des entreprises publient des rapports trimestriels pour leurs actionnaires.

Ça devient compliqué de penser au-delà. Heureusement les défenseurs des énergies renouvelables et du développement durable sont là pour nous rappeler les exigences du long terme. Kandeh vous l'a dit avec son enthousiasme si communicatif, et son leadership a déjà déplacé des montagnes au sein des Nations Unies.

L'année dernière, à Rio+20, la communauté internationale a décidé de penser un peu plus au long terme, vers l'horizon 2030, en se donnant un rendez-vous exceptionnel en 2015 afin de négocier des objectifs de développement durable pour l'humanité tout entière. Manifestement l'accès à l'énergie pour tous et, plus généralement, les futurs de l'énergie en feront partie. D'ores et déjà les Etats membres des Nations Unies réfléchissent au choix de ces objectifs qui représenteront les priorités et l'effort commun des nations.

Les entreprises, qui veulent également contribuer à cette sélection d'objectifs de développement durable, ont placé l'éducation en tête. J'ai plaisir à le dire à l'UNESCO dont c'est la mission primordiale et que je remercie, chère Gretchen Kalonji, de nous accueillir ce soir. Et que je remercie aussi pour son leadership dans le domaine de l'eau et dans celui des océans, avec le Programme hydrologique mondial et la Commission océanographique. Combien sont-ils à savoir que l'UNESCO mène le savoir de l'eau et des océans ? Sans doute l'organisation pourrait-elle faire savoir plus fortement qu'elle mène ce rôle discret, mais indispensable.



Credit photo © ADEME

Revenons à 1973. C'est la crise pétrolière. C'est aussi le moment où l'un des dirigeants de l'OPEP prononce cette phrase fameuse : « L'âge de pierre ne s'est pas arrêté par manque de pierres ». Et en effet on a trouvé mieux que les pierres. Cet homme, le Sheikh Yamani, pensait au pétrole. L'âge du pétrole et des combustibles fossiles ne s'arrêtera pas par manque de pétrole ou de combustibles fossiles, il s'arrêtera parce qu'on aura trouvé mieux. Et ce mieux, ce sont les énergies renouvelables.

Ayant quelque peu moi-même participé depuis 1973 à cette aventure - hélas le temps s'écoule - je rends hommage aux précurseurs cités dans l'édition

spéciale du journal des énergies renouvelables qui a nous été distribuée : le dessinateur Reiser, le professeur Trombe, l'architecte Michel, le petit noyau dont Wolfgang Palz nous a parlé. J'ai vu se succéder les différentes étapes du développement de l'énergie solaire. On a commencé par le plus simple, le bioclimatique, le mur capteur, le chauffe-eau solaire. A propos, je ne comprends pas qu'il ne soit pas obligatoire, celui-là. Voilà un dispositif simple, robuste, efficace. Voyez les toits à Barcelone, Tel Aviv, Alger, autour de la Méditerranée, ça marche, vous payez moins cher, les chauffe-eau solaires sont partout ; même au Danemark pour le chauffage urbain.

On a vu les centrales solaires thermiques. L'une des premières c'était Thémis mise en service en 1983 juste à côté du four d'Odeillo. Comme souvent en France, on a manqué de persévérance. Le prix du pétrole a baissé, l'informatique était défaillante, on a fermé la centrale en 1987. Maintenant on les voit revenir. Il y eut ce magnifique projet, si enthousiasmant, appelé Désertec, qui devait relier les deux rives de la Méditerranée par un réseau distribuant l'électricité solaire produite au Sahara. C'était un beau partage des efforts et des ressources. Mais c'est au point mort, l'Europe ne sait plus très bien où elle en est. Cependant le Maroc poursuit un grand programme d'énergies renouvelables.

Et puis arrive la fée photopile, si jolie et brillante, qui convertit la lumière en électricité. Au départ les gens soi-disant sérieux la confinaient aux usages isolés, loin du réseau, pour alimenter les balises, les signalisations routières, les éclairages de campings. Mais la fée s'est accrochée, créant l'ensemble foisonnant des techniques photovoltaïques, cellules, modules, assemblages, connectique, liens avec Internet et la révolution digitale. Aujourd'hui, l'électricité photovoltaïque s'est introduite sur les marchés de l'énergie, parvenant même, dans certains pays, à la parité avec le prix du kilowatt/heure sur le réseau de distribution, concurrençant les sources d'électricité centralisées, du moins les installations nouvelles.

A coup sûr, l'énergie du soleil est la solution d'avenir, la plupart des experts en sont convaincus. Mais à quel horizon ? Lors de la préparation de Rio+20, certains envisageaient de proposer à la communauté internationale de financer un prix international d'achat garanti afin d'aller plus vite dans la courbe d'apprentissage et de baisser rapidement le coût du photovoltaïque. D'autres répliquaient que l'électricité photovoltaïque coûtait cher pour une production trop faible et qu'il valait mieux cibler l'efficacité énergétique. Le président de l'ADEME, Bruno Lêchevin, nous a rappelé qu'il fallait sans doute faire les deux. Au reste la production est-elle si faible ? Lorsque vous vous promenez en Allemagne, vous constatez qu'une maison sur trois est équipée de panneaux photovoltaïques sur le toit.

Ce n'est plus la petite source isolée, cela devient une part notable de la capacité électrique nationale. Au point que les producteurs industriels d'électricité se plaignent, comme jadis les fabricants de fiacres s'inquiétaient des progrès de l'automobile : « Nous sommes en danger » ! Et c'est là que nous retrouvons Yumkella, la politique, au sens de l'anglais policy, la stratégie, la programmation, les mesures. Quelle est la bonne politique ? Faut-il défendre les fiacres ? Ou hâter leur éviction ? Il me semble que les choix de l'Allemagne méritent plus d'attention que nous ne leur en portons.

Je reviens de Varsovie, où avait lieu une introduction aux négociations climatiques de décembre prochain. Comme vous le savez, Marie-Hélène Aubert vous l'a rappelé, ces négociations doivent culminer à Paris en 2015, où les Etats doivent se mettre d'accord sur un successeur au protocole de Kyoto et le mettre en œuvre au plus tard en 2020, le délai de cinq ans étant laissé aux procédures de ratification nationales. Malheureusement les discussions piétinent. Comment fait-on pour nourrir en énergie le développement économique et social sans émettre de gaz carbonique ? Chacun se regarde, personne ne bouge. Il faut que des pays montrent l'exemple.

Eh bien un pays a pris une décision politique, une vraie décision politique, du genre de celles qui font - ou défont - l'histoire. L'Allemagne a décidé de passer aux énergies renouvelables, quasiment cent pour cent dans la seconde moitié du siècle ! Il y a certes d'autres pays européens qui ont

développé les renouvelables, l'Espagne, le Portugal, le Danemark. Il y en a deux qui émettent moins de CO<sub>2</sub> que les autres, la Suède et la France. Mais là, c'est le champion industriel réputé dans le monde qui se lance dans un projet radical, avec l'approbation de sa population.

Je sais bien que la transition énergétique allemande a encore un parfum de charbon et de lignite parce qu'elle est inspirée en partie par la crainte de l'énergie nucléaire, mais tout de même pour une décision, c'est une décision. Et c'est très important et très instructif de suivre le déroulement du projet et d'en tirer les leçons. Leçons sur les difficultés techniques, le transport et le stockage de l'électricité, la régulation du réseau électrique, les répercussions sur les pays voisins, l'équilibre entre les moyens de production répartis et centralisés, les réponses aux pointes de consommation, les coûts pour les particuliers et les entreprises, la concurrence chinoise pour la production des panneaux solaires, la stabilité de l'encadrement fiscal et réglementaire, le développement des coopératives, et, au total, les avantages et les inconvénients rencontrés.

Je trouve dommage que l'on se contente de vanter ou de blâmer l'energiewende sans y regarder de plus près, un peu de la même manière qu'on glorifie ou vilipende tout uniment l'énergie nucléaire. Il est bien clair que la transition vers les renouvelables bouscule des intérêts et crée des perdants qui vont se défendre et l'accuser de tous les maux. Il est vrai aussi qu'il faut éviter les erreurs et les injustices.



Crédit photo © ADEME

Mais c'est vraiment une bataille à mener. Cette bataille, Yumkella rappelait le nombre de ceux qui sont dépourvus d'accès à l'énergie, c'est à la fois pour répondre aux besoins de l'humanité et pour respecter les limites de la planète.

Bientôt huit milliards d'humains. Il faut leur bâtir une belle vie et, pour cela, les énergies renouvelables sont un de nos meilleurs atouts. Mais nous n'y parviendrons qu'avec le soutien des peuples. On nous objecte par exemple que l'énergie solaire prend de la place. Si l'on voulait satisfaire les besoins en électricité de la France avec le photovoltaïque, il faudrait couvrir de panneaux 3 % du territoire. Tiens, 3 %, c'est justement la surface couverte par le bâti en France. On sait maintenant fabriquer des films souples, et même en matériaux organiques, qui transforment la lumière en électricité. J'imagine donc les bâtiments du futur recouverts d'une peau photovoltaïque. L'énergie solaire sera consubstantielle à l'industrie du bâtiment. Y a-t-il plus belle preuve de l'ingéniosité humaine que les bâtiments à énergie positive qui commencent à apparaître un peu partout ?

Mesdames et Messieurs, voilà longtemps que nous évoquons l'avenir des énergies renouvelables et que nous les associons à l'amélioration des conditions de vie de l'humanité ainsi qu'à la protection de la biosphère. Voilà longtemps que nous perfectionnons les techniques et les politiques. Voilà longtemps que nous tenons bon, que nous persuadons nos concitoyens, que nous avançons. De temps en temps nous nous disons « Ca y est ! » et puis ça retombe légèrement parce qu'on a ouvert une mine de charbon quelque part. Maintenant c'est décidé, laissons le charbon sous terre, place au solaire !

Merci.





- III -

# Contributions additionnelles



## Document d'orientation du CEA sur les énergies renouvelables

Le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) est très actif dans les études sur la transition énergétique à long terme et concentre ses efforts de R&D sur les énergies n'émettant pas de CO<sub>2</sub>.

La contribution du CEA au développement de l'énergie nucléaire est largement reconnue. Le CEA a également accru son implication dans le développement des énergies renouvelables, et de manière plus générale, dans les nouvelles technologies pour les énergies.

Ses recherches dans ce domaine s'appuient sur une approche systémique bâtie sur une adéquation optimisée entre la production et la demande. Cela concerne ainsi le développement de technologies d'énergies renouvelables à bas coût comme l'amélioration de l'efficacité énergétique. Cette approche systémique est appliquée dans le secteur des transports, mais aussi pour les applications stationnaires (production et utilisation d'énergie dans les bâtiments, les industries et les réseaux).

Les activités de R&D du CEA sont très diverses et concernent aussi bien la recherche fondamentale que le développement de prototypes. Elles sont toutefois toujours motivées par la volonté d'accompagner la croissance industrielle et la création d'emplois et de contribuer à l'amélioration de la compétitivité des entreprises par le biais d'actions innovantes.

Cette note est axée sur le programme de recherche du CEA dédié à la production d'énergies renouvelables. Ce programme tente de répondre aux problématiques spécifiques de la réduction des coûts et du développement de solutions permettant une utilisation efficace des énergies intermittentes (stockage, injection dans les réseaux). Des approches plus transversales seront également présentées, telles que le rôle de « l'intelligence » dans le développement des énergies renouvelables, les études sur les économies des systèmes et la sécurité des nouvelles technologies pour les énergies.

### A. Production d'énergie solaire au CEA et ses difficultés

**Photovoltaïque sur silicium** : nos recherches couvrent la chaîne complète, de la purification du silicium à la fabrication de modules, en passant par le traitement de cellules à haut rendement. Elles ont pour principal objectif la réduction des coûts de fabrication.

**Photovoltaïque à concentration** : les modules à bas coût, fiables, à haut rendement et durables constituent le principal axe d'innovation.

**Centrale solaire à concentration** de type Fresnel et les différentes technologies de transfert thermique : les principales innovations résident dans la création de nouvelles conceptions permettant de réduire

les dépenses d'investissement et d'exploitation, et d'adapter ces centrales aux environnements difficiles tels que les déserts. Pour augmenter le rendement global de ces centrales et mieux adapter la technologie aux différents climats et environnements, la co-génération de froid et la désalinisation de l'eau sont également étudiées. Le stockage thermique est un autre défi complexe qui fait l'objet de travaux de recherche et de développement, afin de réduire l'impact de l'intermittence de ces énergies.

### B. Défis de l'intégration des énergies renouvelables intermittentes

La prévision de la production, le stockage de l'énergie, la production en temps réel, l'adaptation à la demande, ainsi que la création d'une approche globale de la production d'énergies renouvelables et de leur intégration aux réseaux sont les principaux thèmes et domaines de recherche du CEA.

**Prévision de la production** : deux aspects importants sont traités. Le premier est la prévision de la production par rapport aux conditions climatiques et d'ensoleillement. Pour pouvoir adapter la production des sources d'énergie intermittentes à la demande, il faut tout d'abord parvenir à prévoir très précisément la production à différentes échelles : 24 h, 1 à 3 heures, 10 min. Le deuxième aspect qui est capital pour les investisseurs, réside dans la prévision de la production d'une centrale solaire sur toute sa durée de vie. Cette opération nécessite une bonne connaissance des conditions de vieillissement de l'ensemble des éléments de la centrale (cellules et modules photovoltaïques, miroirs solaires à concentration, tubes de transfert thermique...).

#### Gestion de l'énergie :

- **Stockage** : le CEA développe plusieurs types de batteries, des nano (matériaux) des électrodes aux batteries complètes, en veillant à chaque étape à minimiser les coûts et à optimiser la capacité. Une grande partie de nos efforts est consacrée au système de gestion de la batterie, car il s'agit d'un élément essentiel pour garantir la sécurité du stockage et optimiser sa durée de vie.
- **La gestion des systèmes électriques** y compris des énergies intermittentes (solaire, éolienne, hydroélectrique), et différents types de stockage font également l'objet d'une R&D intensive.
- **La modélisation**, incluant des aspects techniques et économiques, est développée et appliquée, par exemple, au dimensionnement des micro-réseaux en fonction des ressources en énergies renouvelables et des besoins locaux.

**Transformation en gaz** : la transformation de l'électricité en un autre vecteur énergétique tel que l'hydrogène ou le méthane peut constituer une option intéressante pour lisser les pics de production et stocker l'énergie produite sous une forme transportable et polyvalente. La difficulté, sur laquelle travaille actuellement le CEA, réside dans le développement de technologies d'électrolyse et de méthanisation à bas coût et haut rendement.

### C. De la biomasse aux biocarburants

Le CEA a concentré ses recherches sur les ressources de biomasse qui ne concurrencent pas les ressources agricoles, à savoir la biomasse lignocellulosique (deuxième génération) et les algues (troisième génération). Ses objectifs sont d'optimiser les rendements et de réduire les dépenses d'investissement et d'exploitation, ainsi que les ressources requises (eau, bois...).

- **Deuxième génération** : le CEA travaille sur des processus innovants de gazéification de la biomasse lignocellulosique (bois et déchets agricoles ou industriels) pour optimiser le rendement carbone de la réaction. Les gaz de synthèse produits peuvent être transformés en biocarburants par le biais de réactions Fischer-Tropsch.
- **Troisième génération** : les recherches se concentrent sur deux aspects complémentaires, à savoir la sélection génétique des microorganismes les plus efficaces pour la production de lipides et l'optimisation de diverses étapes du processus, des réacteurs photobiologiques à la collecte d'algues, en passant par l'extraction des lipides.

### D. Approches transversales

**TIC et énergies renouvelables** : les recherches du CEA bénéficient d'une forte interaction entre technologies de l'information et des communications (TIC) et technologies des énergies : développement de capteurs polyvalents spéciaux, traitement des données et microsystèmes pour le contrôle et la gestion en temps réel et/ou à distance des systèmes électriques, algorithmes et codes spécifiques (prévision de la production, systèmes de gestion de batterie...), exploration de données et développement de code pour les réseaux intelligents, maintenance prédictive et à distance, etc.

**Politiques technico-économiques, prospectives et R&D pour les énergies renouvelables** : le programme du CEA pour les dépenses d'investissement et d'exploitation concerne différents niveaux.

- **Technico-économie et ACV** : développement de nouvelles technologies pour l'énergie, sous la forme de nouveaux composants, logiciels ou services toujours accompagné d'évaluations tech-

nico-économiques et de positionnement sur le marché. L'analyse du cycle de vie (ACV) des composants énergétiques (modules photovoltaïques, batteries...) est également appliquée de manière systématique pour éviter les processus trop coûteux et les solutions incluant des matériaux rares ou potentiellement dangereux.

- **Macro-économie** : les études macro-économiques font partie du programme du CEA et visent à évaluer l'environnement économique, son évolution et les conditions qui permettront aux nouvelles technologies d'accéder ou non au marché. Ces études évaluent également la nécessité d'un soutien financier du gouvernement pour aider ces innovations à répondre aux conditions du marché.
- **Études prospectives** : dans le cadre de l'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie (ANCRE), le CEA participe à une étude prospective basée sur 4 scénarios énergétiques différents « Décarbonisation par l'électricité », « Sobriété renforcée », « Nucléaire et énergies renouvelables » et « Vecteurs diversifiés » ; pour évaluer leurs coûts, émissions de CO<sub>2</sub> et principales difficultés technologiques respectives à l'horizon 2030.

**Sécurité** : en raison de sa participation au secteur nucléaire, le CEA est traditionnellement largement impliqué dans les questions de sécurité. La transformation de l'énergie est toujours associée à des dangers potentiels. Aussi, cette implication et cette approche restent présentes dans tous nos développements de technologies énergétiques : stockage (choix des matériaux et processus, gestion de l'énergie), hydrogène (production, haute pression ou stockage hybride, pile à combustible), photovoltaïque (dangers électriques), ainsi que pour les technologies à haute température (solaire à concentration, stockage thermique, réacteurs de gazéification de la biomasse...).

### E. Proposition du CEA pour un déploiement à grande échelle des énergies renouvelables

- Augmenter les investissements dans la recherche et le développement pour imaginer de nouvelles solutions et réduire le coût des énergies renouvelables, ainsi que le coût de l'intermittence.
- Développer des technologies de stockage adaptées aux différentes utilisations (stockage de masse, stockage délocalisé, échelles temporelles et énergétiques différentes, compensation de l'intermittence, services divers du réseau...).
- Développer et déployer différents types de solutions (TIC, électrotechniques, algorithmes, architectures de grille...) pour une adéquation optimisée en temps réel entre la production et la demande, même en présence d'un fort taux d'énergies intermittentes.

- Adapter les énergies renouvelables et les solutions de stockage aux ressources (hydro-électrique, biomasse, solaire) et aux économies locales.
- Développer des approches systémiques telles que le choix optimisé de vecteurs énergétiques en fonction du lieu et de l'environnement, la cogénération (électricité, froid, chaleur, eau désalinisée...) ou l'optimisation de l'efficacité énergétique des sites industriels.
- Développer pour les pays en développement des technologies prêtes à l'emploi associées à des solutions de gestion à distance et de maintenance préventive.
- Développer des composants pour les énergies renouvelables utilisant peu de matériaux rares.
- Recycler.

## Bernard TARDIEU

*Président de la Commission Energie et Changement Climatique, Académie des Technologies, CNRS ENR*

### L'approche géographique, climatique et systémique de la Commission Energie et Changement Climatique

Toutes les énergies renouvelables sont exposées à des facteurs géographiques et climatiques par essence. Ce qui est efficace et économique dans une géographie ou un climat peut varier dans un autre. S'il s'agit de production électrique, la simultanéité ou la non simultanéité de la production et de la consommation a un impact crucial sur la pertinence de la technique. Par exemple, dans les pays développés chauds, le pic de consommation électrique a lieu en milieu de journée l'été à cause de la forte consommation des appareils d'air conditionné. La production d'électricité photovoltaïque est alors pertinente, car l'électricité est consommée en même temps qu'elle est produite. La Californie est dotée d'un bon ensoleillement et d'une faible nébulosité : elle complète son parc photovoltaïque par de la production d'électricité solaire thermodynamique qui peut être stockée sous forme thermique (les sels fondus, fluorure, chlorure, nitrates sont utilisés comme fluide caloporteur et comme stockage thermique) et décalé dans le temps de 4 à 5 heures ce qui permet de fournir de l'électricité durant la pointe de consommation du soir lorsque la production photovoltaïque s'arrête avec le coucher du soleil. La production solaire thermodynamique exploite le rayonnement solaire et exige des ciels clairs et une distance à la mer d'une quinzaine de kilomètre. L'utilisation en zone tropicale et équatoriale n'est par contre pas rentable. Le Maroc bénéficie d'une géographie et d'un climat favorable pour l'éolien et pour le solaire. Le vent est favorable dans le nord du fait du détroit de Gibraltar (3000 heures/an) et dans le sud (3500 heures/an) du fait du régime des alizés et le soleil fréquent. Le vent est particulièrement régulier et les périodes sans vent sont rares et de courte durée. Le Maroc a fait le choix du solaire thermodynamique pour la même raison que les Californiens ou que les Saoudiens, pour pouvoir décaler la production et couvrir les besoins électriques du soir. Pour la production solaire thermodynamique, il faut une source froide puisque cette technique utilise le cycle de Carnot. Dans le cas du Maroc, cette source froide est fournie

par l'eau d'un lac de barrage existant et économiquement amorti ce qui ne pèse pas sur la rentabilité du projet. En parallèle, le Maroc utilise au maximum sa production hydroélectrique et construit une nouvelle station de turbinage pompage pour assurer la continuité de la production et assurer la transition avec la production de charbon qui doit malgré tout rester en température et en veille (ce qui n'est gratuit ni en charbon ni en disponibilité des agents).

Il y a donc une différence fondamentale entre les énergies renouvelables stockables et les énergies renouvelables intermittentes. L'hydraulique est fondamentalement une énergie de stock puisque l'eau du réservoir est mobilisable en quelques minutes à la demande. Même la production des centrales au fil de l'eau comme celles du Rhône ou du Rhin peut être modulée en jouant sur le « coin d'eau » qui est constitué par le volume d'eau placé entre le niveau d'eau du fleuve en pente lorsque toutes les turbines fonctionnent et l'horizontale du fleuve immobile, entre ses digues, lorsque les turbines sont fermées. Il en est de même pour toutes les énergies renouvelables biogénérées que ce soit la biomasse solide, liquide ou gazeuse. Toutes sont stockables et mobilisables à chaque instant. C'est d'ailleurs pour cela que l'Energiewende (transition énergétique) allemande prévoit qu'en 2050 le biogaz jouera un rôle central d'adaptation de la production électrique à la demande électrique pour une puissance installée de l'ordre de 60 GW (le mode de production de ce biogaz n'est pas explicité). Ces biogaz et l'ensemble des bioénergies peuvent être utilisés pour produire de l'électricité, mais aussi et peut-être surtout pour produire de la chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire ou comme carburant dans les moteurs thermodynamiques et électriques avec usage des piles à combustible. Ces différentes énergies renouvelables de stock sont indispensables dans un système électrique surtout si les autres sources sont intermittentes et irrégulières.

Pour limiter les conséquences de l'intermittence, il existe deux réponses classiques : le foisonnement et le stockage.

Le foisonnement procède de la constatation que plus le territoire est étendu, plus les énergies intermittentes se relaient d'une zone à l'autre jusqu'à idéalement assurer la continuité. Ce concept simple dépend de la géographie et du climat. En Europe les régimes de vent sont souvent structurés par la position des anticyclones et les périodes de vent faible touchent de grands territoires. Les périodes de génération éolienne par zone isolée sont généralement inférieures à 2000 heures par an en Europe du Nord alors qu'elles sont de l'ordre de 3000 heures à 4000 heures au nord du Maroc ou en Espagne du sud. En offshore et selon les zones, les périodes de production peuvent aller de 3000 heures à 4000 heures. Le stockage, dans son principe permet de pallier les périodes de faible production intermittente (périodes anticycloniques pour le vent, hiver et nuit pour le PV). Nous avons vu que l'hydroélectricité est par essence une énergie stockée. Le recours à ce stock ne peut suffire pour adosser l'éolien français. L'hydraulique de stock en France permet de produire à pleine puissance (9 GW en France, soit le double environ de la production éolienne actuelle en période venteuse) pendant 1800 heures environ et est disponible en quelques minutes, mais chaque année il se « recharge » uniquement durant la saison humide. Par ailleurs la grande flexibilité de l'énergie hydroélectrique est nécessaire à la bonne gestion du réseau électrique. Il ne serait donc pas pertinent d'en consacrer une trop grande part à compenser les trous de l'éolien. Les stations de turbinage pompage (environ 5 GW en France) sont indépendantes des apports en eau et réutilisables sans fin, mais d'une part l'énergie du pompage est supérieure à l'énergie produite (la valeur de l'électricité fournie est évidemment plus élevée), d'autre part les STEP française peuvent fonctionner environ 8 heures à pleine puissance (plus de 20 heures pour GrandMaison et Montézic), ce qui est assez court et plus adapté à l'adossement du solaire que de l'énergie éolienne. Le foisonnement mêlé de l'éolien et du photovoltaïque améliore la continuité, mais ne résout pas la fourniture durant le pic du soir en hiver lors des périodes anticycloniques qui sont en générale froides.

D'ailleurs l'énergie hydroélectrique aussi a besoin de foisonnement. La crise énergétique au Brésil en 2000 résultait d'une période de faible hydraulité pendant 3 ans dans la partie centrale du pays et du manque de réseau de transport de grande puissance entre le sud bien arrosé et le centre. Des lignes de transport ont été construites depuis. L'énergie hydraulique représente 80 % de l'électricité générée. Globalement, dans toute l'Amérique latine l'électricité est majoritairement d'origine hydraulique.

Le recours au foisonnement a un coût. Si l'objectif poursuivi est d'assurer une production la plus constante possible avec de l'énergie renouvelable, en profitant au maximum du foisonnement, la puissance installée qui en résulte est très supérieure à la demande de pointe (par exemple l'Energiewende prévoit en 2023, 103 GW d'éolien et de photovoltaïque). En 2013,

65 GW ont déjà été installés. Les réseaux de transports à grande distance qui permettent l'usage maximal du foisonnement peuvent être sous employés, c'est-à-dire qu'ils risquent de ne fonctionner à pleine puissance que pendant des périodes brèves. Dans le cas de l'éolien, il est souvent préférable du point de vue du réseau de favoriser la production par vent faible ou modéré aux dépens de la production par vent fort mais rare, même si ce choix conduit à produire moins d'énergie, c'est-à-dire moins de kWh (donc moins de chiffre d'affaires si l'électricité est vendue avec un prix de kWh fixe).

C'est pour toutes ces raisons que les écologistes américains privilégient le gaz pour adosser l'énergie éolienne. Aujourd'hui, le gaz est très bon marché, aux Etats-Unis. Cela est dû au développement des gaz de schiste. L'intérêt économique d'y recourir est fort, mais à terme on peut supposer qu'il s'agira de gaz biogénéré et renouvelable.

L'approche géographique et climatique concerne également les bioénergies. La production de canne à sucre, d'huile de palme, entre autres, est bien plus forte dans les pays tropicaux. La culture de la palme peut se faire sans déforestation. En Colombie, l'huile de palme remplace parfois la canne à sucre parce que la rentabilité énergétique est plus forte. Il y aura probablement un marché mondial des bioénergies.

Les énergies renouvelables demandent une approche géographique, climatique et systémique car l'objectif final est de fournir de l'électricité bon marché à tous, pour un usage industriel ou domestique, sans coupure et sans variation de fréquence et de tension. Il faut donc que le marché de l'électricité soit adapté à ces particularités. Or pour l'instant, le marché européen n'est pas un vrai marché, puisque les énergies intermittentes sont subventionnées en fonction de l'énergie produite, sans prendre en compte la demande des consommateurs et en leur attribuant un prix marginal nul qui les place en tête du « merit order ». Il y a obligation pour les réseaux de prendre en totalité l'énergie produite à l'instant où elle est produite. En revanche, l'électricité produite par du gaz ou du charbon est sollicitée de manière intermittente et peu prévisible, ce qui impose un maintien en opération permanent, avec une production brève et morcelée et donc non rentable pour les investisseurs sauf pour les installations déjà amorties. Pourtant cette réserve de puissance est indispensable. Elle n'est sans doute pas rémunérée à son juste prix, surtout s'il s'agit de centrales modernes à haut rendement et à taux d'émission de CO<sub>2</sub> bas qui, elles, ne sont pas encore amorties. Si la durée de vie des énergies intermittentes est longue comme elle l'est pour l'énergie hydroélectrique, alors en dehors de toute subvention, on peut espérer que le marché électrique européen d'énergie et de puissance sera suffisamment bien conçu pour conduire à un prix et une qualité d'électricité satisfaisants.

## Bernard MELCHIOR

Bluenergy Germany AG, Allemagne

### L'innovation photovoltaïque et les applications de Bluenergy

Bluenergy œuvre pour une utilisation intelligente et créative des énergies renouvelables et des technologies de contrôle de la pollution, des concepts exhaustifs d'utilisation des ressources existantes, une rentabilité économique et une coexistence harmonieuse de l'environnement, de la nature et de l'être humain.

Bluenergy travaille sur la transformation de la lumière et du vent en électricité. Ces énergies sont disponibles partout dans le monde, inépuisables, propres et sûres.

### Les technologies de fluorosilicone et encapsulation des cellules solaires.

Bluenergy a mis au point une nouvelle méthode d'encapsulation qui n'utilise pas du verre, mais un fluoropolymère et du silicone, qui sont des matériaux non réactifs dotés de propriétés améliorant l'efficacité des modules : pas de ternissage de la surface causé par le sel, la poussière, le sable, meilleure résistance à la corrosion atmosphérique, évacuation thermique optimale, meilleur rendement etc. De plus, le fluoropolymère permet l'impression d'une structure en dendrite présentant trois caractéristiques principales : absorption de lumière sous tous les angles, absence de reflets et effet lotus pour renforcer la protection contre les salissures. Par ailleurs, ce système présente un rendement supérieur et un coût réduit.

Dans les zones poussiéreuses comme les déserts, le sable et les poussières qui se déposent sur les modules photovoltaïques réduisent leur rendement. Ce phénomène est particulièrement présent dans les régions proches de l'Équateur, où les modules photovoltaïques sont installés presque à l'horizontale. Cette orientation favorise l'accumulation de poussière, qui ne peut pas s'évacuer. Même lorsque les modules sont très inclinés, la poussière reste piégée sur les bords. Dans le désert, il y a toujours des périodes pendant lesquelles l'air est saturé de poussières et où les rayons du soleil n'atteignent pas toute la surface des modules photovoltaïques, ce qui entraîne une dégradation supplémentaire des performances. La technologie innovante d'encapsulation de Bluenergy avec le Téflon et l'effet lotus est la solution la plus efficace aux problèmes de production d'énergie dans les déserts.

**Intégration du photovoltaïque à l'architecture** avec SUNCLAY + SUNERGY, un système photovoltaïque à deux composants pour une intégration harmonieuse, esthétique et flexible.

SUNCLAY est une tuile d'argile classique légèrement modifiée et rainurée sur sa partie supérieure qui constitue le support des modules photovoltaïques

SUNERGY. Ces modules photovoltaïques précâblés sont fabriqués selon un concept innovant d'encapsulation par fluoropolymère et silicone breveté et se présentent en accordéon. Selon le plan de pose, le clipsage des modules commence au niveau de la première chaîne, au point supérieur du générateur. Les parties inférieures et supérieures de la chaîne des modules photovoltaïques peuvent être rapidement connectées aux faisceaux de câbles via les connecteurs non interchangeables, facilement reconnaissables et isolés. La capacité de production peut être développée progressivement d'année en année sans causer de problèmes au niveau du toit.

### Les modules spéciaux ALMg3 inoxydables

L'habitation peut être couverte de tuiles classiques auxquelles on intègre sans perçage les éléments des modules photovoltaïques en fluoropolymère avec une surface en dendrite. Avec ce système, les pièces en aluminium ne pèsent que 600 g. Il est donc parfaitement adapté aux pays comme les Caraïbes ou les Seychelles, dans lesquels les habitations ne peuvent supporter le poids du béton ou de tuiles en argile. Les modules Bluenergy ALMg3 peuvent être utilisés sur des toits existants ou lors de leur construction. L'installation et la réparation s'effectuent facilement. Le système peut être développé pour augmenter la production d'électricité. Le câblage s'effectue par-dessus les composants préfabriqués et ne nécessite aucun perçage des éléments du toit.

De nombreuses expertises ont confirmé qu'une surface de toit de 8 à 12 m<sup>2</sup> par personne est disponible. Bluenergy s'est basé sur une surface de seulement 6 m<sup>2</sup>. Ce chiffre minuscule, multiplié par les 500 millions d'Européens, donne une puissance photovoltaïque théorique égale à 514 centrales nucléaires !

### BSWT, la combinaison solaire/éolien

Que faire si le vent ne souffle pas ? Ou si le soleil ne brille pas ? Et pourquoi ne pas utiliser ces deux sources d'énergie en même temps ? C'est ainsi qu'est née l'idée du générateur solaire/éolien combiné. Les éoliennes traditionnelles présentent un coût de maintenance élevé.

L'éolienne solaire de Bluenergy, constituée d'un mât vertical et de deux hélices dont les deux faces sont recouvertes de cellules photovoltaïques, génère de l'électricité à partir de la lumière du soleil et du vent pour des applications commerciales, résidentielles et publiques. Le système BSWT de Bluenergy a nécessité la création d'un nouveau design.



Photo credit: Bluenergy

Le générateur ne se trouve plus en hauteur, mais au pied de l'éolienne, afin d'en simplifier l'accès. Aucune grue n'est nécessaire pour procéder à des réparations ou à des opérations de maintenance.

La surface éolienne a été augmentée et entièrement équipée de modules photovoltaïques en fluorosilicone. La « vis éolienne » se compose de segments identiques, ce qui réduit considérablement les coûts de production. L'éolienne solaire de Bluenergy est parfaitement fonctionnelle par vents forts. En fait, ces vents stabilisent le mat, ce qui lui permet de produire de l'énergie lorsque les éoliennes classiques doivent être neutralisées. Ce système est donc plus efficace, car il produit de l'énergie dans des conditions qui nécessitent l'arrêt des systèmes classiques. Il est parfaitement adapté à de nombreuses applications futures, comme une antenne radio, le navire de désalinisation breveté Bluenergy, etc. Cette éolienne constitue un hybride innovant, qui capture l'énergie du vent par le biais de la rotation de pales verticales et collecte l'énergie solaire grâce aux cellules photovoltaïques encapsulées directement sur les pales.

Le BSWT ne génère aucune nuisance sonore et fonctionne en toute sécurité par vents faibles (6 km/h) ou forts (160 km/h et plus). Les éoliennes classiques fonctionnent sur un intervalle plus limité (19 à 72 km/h). La structure en dendrite à la surface des modules permet une absorption de la lumière à partir de tous les angles, ce qui optimise la production d'énergie solaire.

la solution combinée de Bluenergy constitue une solution énergétique efficace pour les régions poussiéreuses telles que les déserts.

### Maison Bluenergy ADS Ball.

La maison Bluenergy ADS Ball est fabriquée en coffrages Styropor (semblables à des briques Lego) remplis de béton armé, ce qui lui confère une véritable solidité.

Elle résiste aux ouragans, aux tornades, aux tremblements de terre et aux tsunamis, ne nécessite aucun système de climatisation et respecte les normes des maisons passives. Elle peut être produite en masse à bas coût et sur site, dans le cadre du concept Bluenergy ADS avec ses propres sources d'alimentation et système de traitement des déchets. Cette maison est particulièrement adaptée aux zones exposées aux ouragans, séismes ou tsunamis et offre une réponse aux situations d'urgence (Philippines, Indonésie, etc.).

Les nouveaux modules photovoltaïques en nid d'abeille de Bluenergy permettent d'alimenter la maison en énergie. Une petite centrale de traitement de l'eau de mer, de l'eau des rivières et des eaux souterraines fournit une alimentation en eau. Une centrale de traitement biologique purifie les eaux usées qui peuvent être ensuite utilisées dans le système d'irrigation souterrain. La maison dispose de protections qui évitent les dommages aux vitrages en cas de tempête ou de tsunami.

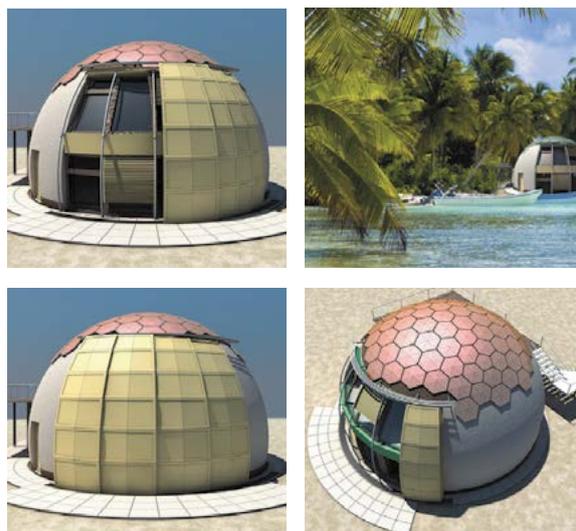


Photo credit: Bluenergy

## Burkhard SANNER

Président du European Geothermal Energy Council

### L'énergie géothermique en Europe, European Geothermal Energy Council

L'énergie géothermique est l'énergie emmagasinée sous forme de chaleur sous la surface de la terre solide. Les ressources géothermiques peuvent être utilisées pour produire de l'électricité et générer de la chaleur. L'énergie géothermique est renouvelable, car de la chaleur remonte en permanence depuis le sous-sol de la Terre jusqu'à la surface. Depuis de nombreuses années, cette ressource est exploitée de manière sûre, fiable et renouvelable sous forme d'électricité et de chaleur, à petite et grande échelles.

La



Figure 1

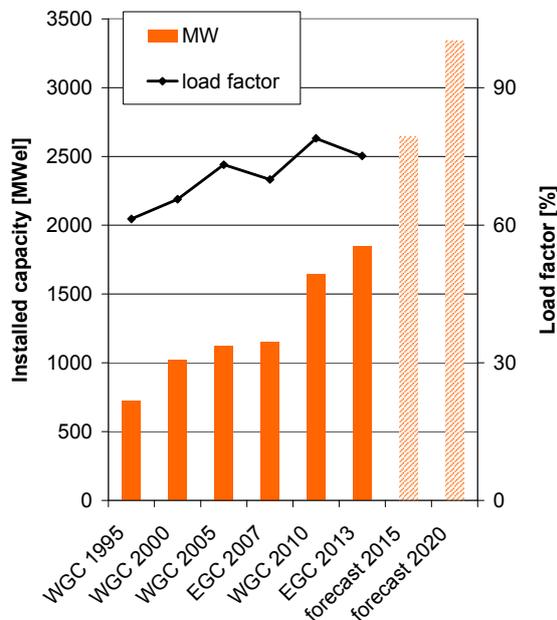


Figure 1

géothermie est l'une des rares sources d'énergie renouvelables capables de fournir de manière régulière et fiable de l'électricité, ainsi que des capacités de chauffage/refroidissement 24h/24 et 365 jours par an. L'énergie géothermique étant disponible presque partout, la production locale permettra de réduire la dépendance aux importations provenant de fournisseurs peu fiables et d'éviter les conflits entre les nations. L'absence de source d'énergie sûre et fiable figure toujours parmi les raisons du sous-développement. En éliminant la dépendance aux importations d'énergies fossiles, l'énergie géothermique peut soulager fortement le budget des pays en développement. De plus, il a été démontré que l'utilisation intégrée de la chaleur et de l'énergie a un impact plus important sur la création d'emplois en raison de l'utilisation de la chaleur géothermique par d'autres sociétés (serres, poissonneries, usines de traitement agroalimentaires, réfrigération, etc.).

### L'électricité géothermique en Europe

La première production d'énergie géothermique a eu lieu en 1904, lors d'une expérience à Larderello, en Italie. La production commerciale a démarré en 1913 et son centenaire a d'ailleurs été commémoré il y a peu. Le développement de la capacité géothermique installée est présenté dans la figure 1. Nous pouvons voir que la géothermie a connu un regain d'intérêt en Europe après presque dix ans de croissance atone. En 2013, la capacité installée de production d'énergie géothermique a atteint environ 1850 MWel.

Il convient également de mentionner que le facteur de charge global de ces centrales a pu dépasser 75 % au cours des dernières années, un record pour les énergies renouvelables. Quelques centrales ont même signalé un facteur de charge proche de 100 % certaines années. La production d'énergie géothermique en Europe a ainsi dépassé les 12 TWh en 2012.

Le projet de recherche GEOELEC, financé par l'Union européenne, a analysé les données géologiques et géophysiques, actuellement disponibles sur divers sites, pour évaluer le potentiel géothermique de l'Europe et localiser les régions les plus intéressantes. Ces travaux se sont traduits par une application Web-SIG qui permet de visualiser le potentiel en fonction de diverses conditions, comme l'horizon temporel, le coût maximum de l'électricité, etc. La figure 2 présente une capture d'écran de l'application. GEOLEC a ainsi pu évaluer le potentiel de l'énergie géothermique en 2030 à 174 TWh pour l'ensemble de l'Europe, dont 34 TWh dans les 28 pays de l'Union européenne. Avec seulement 12 TWh produits en 2012, ce potentiel est loin d'être totalement exploité !

### Chaleur et froid géothermiques en Europe

En Europe, près de la moitié de la consommation d'énergie totale finale est utilisée pour produire de la chaleur. L'énergie géothermique peut fournir de la chaleur pour toutes sortes d'applications à échelles diverses et est utilisée à cet effet depuis les temps anciens (chauffage des thermes depuis l'Empire romain et réseau de chaleur en France depuis le Moyen Âge). La chaleur géothermique peut également alimenter des refroidisseurs à absorption, et la Terre peut directement être utilisée dans des processus de refroidissement via des technologies de géothermie peu profonde.

En 2012, la capacité installée de chauffage géothermique par ressources profondes dépassait 8000 MWth, dont près de la moitié était utilisée dans des réseaux de chaleur. Concernant la géothermie peu profonde (pompes à chaleur géothermiques et stockage d'énergie thermique souterrain), le taux de croissance a été plutôt bon, avec une capacité d'au moins 17 000 MWth installée fin 2012 et distribuée à plus de 1,3 million de pompes à chaleur. Le marché du chauffage et du refroidissement par géothermie se caractérise comme suit : pour les réseaux de chaleur géothermiques, la nécessité de disposer d'une infrastructure adaptée est un point essentiel, pour les nouveaux réseaux comme pour les réseaux remis à neuf. Le développement doit également s'orienter vers des solutions évolutives : capacités réduites ou importantes et haute ou basse température selon la demande. Dans le domaine de la géothermie profonde, la crise économique a eu un impact fort sur le marché des pompes à chaleur, notamment les modèles de petite taille destinés à une utilisation résidentielle. Toutefois, un développement intéressant est à noter au niveau des grandes installations dans le secteur commercial.

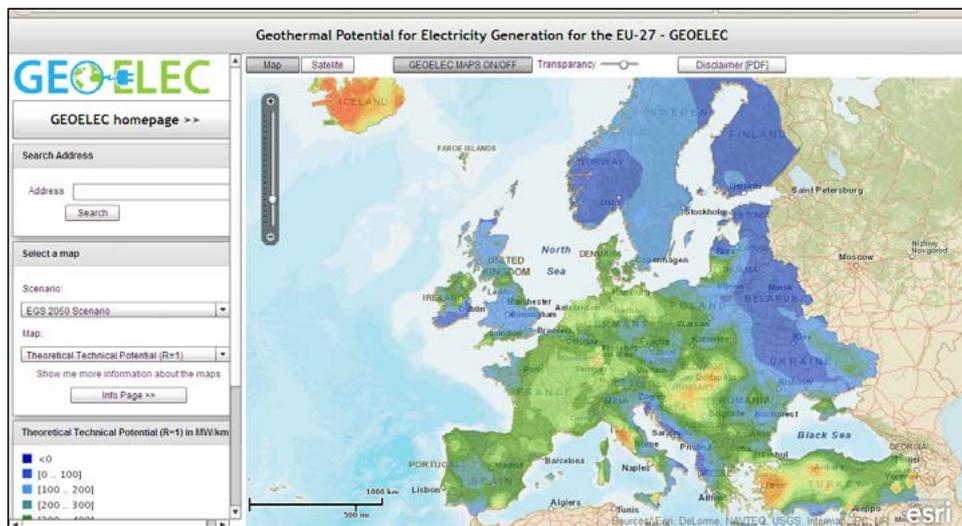


Figure 2

## Vision du secteur géothermique en Europe

*Horizon 2020 : établir les bases d'une industrie géothermique européenne.*

- Développer les ressources hydrothermiques en Europe à partir des ressources à haute enthalpie (Italie, arc volcanique égéen et régions ultra-périphériques) et à enthalpie intermédiaire (bassins continentaux, îles et régions présentant un volcanisme néogène, etc.), ainsi que dans les pays n'appartenant pas à l'Union européenne (Turquie et région caspienne, rift africain, Amérique du Sud, etc.).
- Développer le concept d'EGS (Enhanced Geothermal Systems) dans les différents environnements et régions géologiques par le biais de la construction de centrales électriques et d'utilisations directes de la chaleur. Cela inclut le développement d'un cycle binaire plus efficace pour les ressources à basse température.
- Établir les bases d'un modèle européen de centrales géothermiques en harmonie avec l'environnement (centrales de taille moyenne avec réinjection de liquide pour minimiser l'impact sur le paysage, l'environnement et le réseau, par exemple) et optimiser le bénéfice

pour les communautés par le biais d'une utilisation innovante du liquide brûlant rejeté par la centrale.

*Horizon 2030 : réduire les coûts pour proposer une source d'énergie concurrentielle.*

- Lancer des programmes de construction massive de centrales géothermiques pour remplacer les centrales à combustibles fossiles vieillissantes et de plus en plus coûteuses, en commençant par les zones les plus prometteuses.
- Transférer la technologie EGS en dehors de l'Europe, dans les zones ne disposant pas de ressources hydrothermiques suffisantes, grâce à l'expertise technique développée.
- Intégrer la géothermie aux systèmes énergétiques résidentiels standard, développer des réseaux de chauffage et de refroidissement intégrant des pompes à chaleur géothermiques et des systèmes de stockage souterrain d'énergie thermique, développer des solutions géothermiques pouvant s'adapter aux infrastructures existantes.

*Au-delà de 2030 : représenter une part significative des sources d'énergie et alimenter l'Europe et le monde avec la géothermie*

## Jean-Luc DUPLAN

Conseiller Cleantech, IFPEN France

### Perspectives de production de carburants à partir de la biomasse, IFPEN France

Les prévisions s'accordent pour dire que la demande mondiale en carburants pour le transport va augmenter. Ces carburants sont principalement issus du pétrole et génèrent une croissance incontrôlée des émissions de CO<sub>2</sub>. La production de biocarburants à partir de la biomasse semble offrir

une alternative à l'exploitation du pétrole. Il existe aujourd'hui deux principaux types de biocarburants : l'éthanol, qui est généralement utilisé tel quel dans les moteurs à essence ou sous forme d'ETBE dans certains pays, et les esters méthyliques d'huiles végétales, utilisés dans les moteurs diesel.

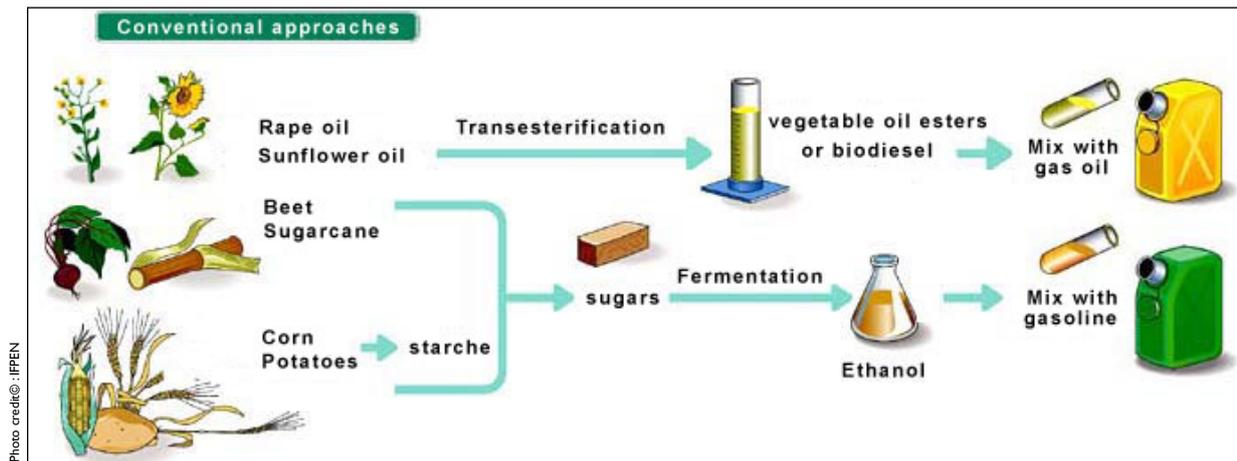


Figure 1 : les biocarburants de première génération

Toutefois, les coûts de production et la limitation des parcelles de culture due à la concurrence avec les cultures alimentaires ont orienté les efforts de recherche et de développement vers la production de nouveaux biocarburants à base de lignocellulose. La biomasse est plus abondante et meilleur marché que les cultures alimentaires. Des méthodes de production de carburants à partir de biomasse lignocellulosique (bois, paille et déchets) par transformation enzymatique et thermoconversion sont actuellement à l'étude. Les États soutiennent le développement des biocarburants pour réduire leur dépendance au pétrole et promouvoir des énergies sobres en carbone.

Il existe aujourd'hui deux principaux types de biocarburants (figure 1) : éthanol pour les moteurs essence et esters méthyliques d'huiles végétales pour les moteurs diesel. L'éthanol est le biocarburant le plus utilisé au monde : 42 millions de tonnes d'équivalent pétrole en 2010, contre un peu moins de 15 millions de tonnes d'équivalent pétrole de biodiesel. Les États-Unis, le Brésil et l'Europe sont les principaux moteurs de cette croissance, bien que de nombreux autres pays témoignent un certain intérêt pour les carburants d'origine végétale.

L'éthanol est actuellement produit à partir de deux types de culture : plantes à sucre (canne à sucre, betterave à sucre) et plantes produisant de l'amidon (blé, maïs). Ces différentes sources nécessitent une étape de fermentation visant à transformer les sucres en éthanol, ainsi qu'une étape de distillation permettant de séparer l'alcool de l'eau. Ces opérations génèrent des co-produits qui sont souvent la clé de la rentabilité d'un projet. Par exemple, la transformation du maïs et du blé produit une grande quantité de résidus (un peu plus d'une tonne de résidus par tonne d'éthanol) qui peuvent être vendus sur le marché de l'alimentation animale. Les esters méthyliques d'huiles végétales sont produits à partir de colza, tournesol, soja ou palme. Lorsqu'une huile est obtenue par broyage de graines oléagineuses, comme le colza, le soja ou le tournesol, un résidu solide est produit (de 1 à 1,5 tonne par tonne d'huile). Ce résidu est généralement utilisé

pour l'alimentation animale. Les huiles végétales ne sont pas adaptées aux moteurs diesel existants des véhicules de tourisme et doivent être transformées par transestérification avec un alcool. Actuellement, le méthanol est utilisé pour produire des esters méthyliques d'huiles végétales et de la glycérine (0,1 tonne par tonne).

### Biocarburants de seconde génération

Les biocarburants de seconde génération sont des biocarburants qui utilisent la biomasse lignocellulosique (figure 2). Leur principal avantage réside dans le fait qu'ils permettent de valoriser la source de carbone la plus abondante de notre planète. La biomasse lignocellulosique est composée principalement de 3 polymères issus de la paroi cellulaire des plantes : cellulose, hémicellulose et lignine, présents en diverses proportions selon la plante. Deux méthodes sont à l'étude aujourd'hui : l'une pour produire du carburant pour moteurs diesel et du kérosène (BTL) et l'autre produire de l'éthanol (l'éthanol pouvant remplacer l'essence, on peut le considérer comme un biocarburant).

### Liquéfaction de biomasse

La technologie BTL est une méthode thermochimique permettant d'obtenir de l'essence synthétique liquide à partir de la biomasse. Elle inclut trois étapes importantes : conditionnement de la biomasse, gazéification et traitement des gaz de synthèse, puis synthèse de carburant pour moteur. Certaines de ces étapes ont été testées dans le cadre de projets industriels avec du gaz naturel (GTL) ou du charbon (CTL). Par le passé, la technologie CTL a déjà fourni une solution aux problèmes d'approvisionnement en pétrole, notamment en Allemagne pendant la seconde guerre mondiale et en Afrique du Sud lors de l'embargo mis en place en réponse à l'apartheid.

### Conditionnement de la biomasse

La première étape consiste à transformer les ressources végétales en un matériau homogène pouvant être injecté dans un gazogène. Elle implique généralement des transformations thermiques et mécaniques.

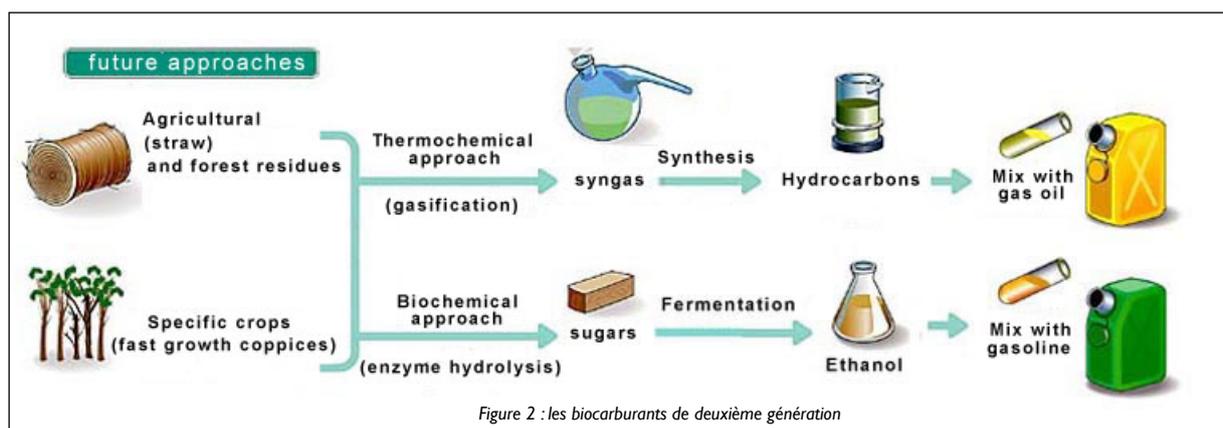


Figure 2 : les biocarburants de deuxième génération

Il existe deux méthodes : la pyrolyse et la torréfaction. La pyrolyse utilise la chaleur pour convertir la biomasse en matériaux sous trois phases : solide (charbon), liquide (huile pyrolytique) et gaz (en majorité du dioxyde de carbone, du monoxyde de carbone, de l'hydrogène et du méthane). La répartition de ces trois phases dépend des conditions de traitement (température, vitesse de chauffe et durée du traitement). Les recherches actuelles visent à transformer les huiles pyrolytiques directement en carburants pour moteur via des traitements par l'hydrogène. Bien qu'intéressante, cette méthode directe semble complexe à mettre en place au vu des quantités d'hydrogène nécessaires et de la différence chimique entre les huiles pyrolytiques produites et les carburants pour automobiles classiques. La deuxième méthode de pré-traitement de la biomasse étudiée est la torréfaction. Depuis les années 80, de nombreuses recherches ont été réalisées sur la torréfaction du bois, qui confère au bois une très bonne résistance aux attaques de champignons et à certains types d'insectes. Toutefois, elle réduit également sa force mécanique, une caractéristique exploitée par les méthodes BTL : la torréfaction facilite le broyage du bois et permet ainsi d'obtenir un solide plus fin, adapté à certaines technologies de gazéification. La torréfaction s'apparente à une dernière opération de séchage (de 240 à 300 °C pendant une heure maximum). En raison de ses températures bien inférieures à celles de la pyrolyse, ce processus consomme nettement moins d'énergie.

### Gazéification et traitement des gaz de synthèse

La gazéification est une opération thermique qui se déroule en présence d'un réactif à l'état gazeux (vapeur d'eau, oxygène) et produit ce que l'on nomme du gaz de synthèse, qui contient essentiellement de l'hydrogène et du monoxyde de carbone. Il contient également des impuretés (carbone ou matière non organique) et d'autres gaz. L'idée est de maximiser la production de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H<sub>2</sub>) tout en atteignant un rapport H<sub>2</sub>/CO situé autour de 2, compatible avec la synthèse de carburant pour moteur. Il est également essentiel d'éliminer les impuretés qui pourraient « empoisonner » le catalyseur utilisé dans le procédé Fischer-Tropsch. Pour ces raisons, la gazéification de la biomasse se

déroule généralement à très haute température (1200-1300 °C) et est suivie d'étapes de purification. Aucune technologie de gazéification de la biomasse n'a encore été exploitée à l'échelle industrielle. La plupart des solutions proposées jusqu'à présent sont dérivées de technologies industrielles utilisées pour le gaz naturel, le charbon ou le pétrole. Le procédé Fischer-Tropsch, nommé d'après les deux chimistes allemands qui l'ont imaginé dans les années 20, est une réaction utilisée pour produire de l'essence, du diesel et du kérosène à partir du gaz de synthèse obtenu par gazéification.

Cette réaction chimique nécessite un catalyseur à base de fer ou de nickel. En présence d'un catalyseur à base de fer, la réaction Fischer-Tropsch produit de l'essence. En présence d'un catalyseur à base de cobalt, elle produit les bases nécessaires à la synthèse de diesel et de kérosène. Les produits obtenus sont exempts de soufre, d'azote et d'arômes. Le diesel de synthèse présente un indice de cétane d'environ 70, bien supérieur à celui requis par les normes actuelles (env. 50). Les constructeurs apprécient la grande qualité de ce carburant pour leurs véhicules. Il permet de réduire les émissions polluantes, notamment de particules, par rapport au diesel classique.

### Production d'éthanol à partir de matières lignocellulosiques

Les étapes de la production d'éthanol à partir de matières lignocellulosiques sont très similaires à celles se basant sur du maïs ou du blé : la matière première est préparée, la cellulose est transformée en glucose (sucre), les sucres sont fermentés pour donner de l'éthanol et l'éthanol est purifié par distillation. Nous ne décrivons que les deux premières étapes qui sont spécifiques à la production de deuxième génération. Il existe actuellement deux méthodes de prétraitement de la matière première, une fois la paille déchirée ou le bois découpé. La structure de la lignocellulose est ouverte par explosion à la vapeur ou chauffage en présence d'acide dilué, ce qui donne un accès aux sucres (hémicellulose et cellulose). Seule la cellulose peut être transformée en éthanol. Le prétraitement à l'acide dilué implique de placer la plante en présence d'acide, de préférence de l'acide sulfurique, à une température modérée (autour de 150 °C) pendant 15 à 20 minutes.

Des processus impliquant une deuxième étape réalisée à une température supérieure (240 °C pendant quelques minutes) sont également à l'étude. Pré-traitement à l'explosion à la vapeur. Pour déstructurer la matrice de lignocellulose, la matière première est brièvement exposée à des conditions de haute pression et de température élevée (15 à 23 bar et de 180 à 240 °C) en présence de vapeur, puis brutalement à une faible pression. Ces deux prétraitements augmentent le coût du procédé. En particulier, ils exigent des investissements dans du matériel capable de supporter la pression et les conditions d'acidité.

La deuxième étape consiste à casser les molécules de cellulose en glucose à l'aide d'enzymes (hydrolyse enzymatique). Du point de vue économique, cette opération est fortement pénalisée par le fait que la consommation d'enzymes est entre 10 et 100 fois supérieure à celle des méthodes conventionnelles (à partir du blé ou du maïs). De nombreux projets de recherche et de développement cherchent à améliorer cette méthode de transformation en optimisant le processus et en augmentant l'activité enzymatique (biologie moléculaire). Le glucose obtenu est ensuite transformé en éthanol de manière tout à fait classique, par fermentation. Certaines études cherchent à combiner l'hydrolyse enzymatique et la fermentation. L'utilisation d'hémicellulose pour produire de l'éthanol est une autre piste étudiée. L'idée est d'optimiser la compétitivité de cette technique. Aujourd'hui, il n'est possible d'obtenir du glucose qu'à partir de la cellulose, qui représente au mieux

50 % des matières lignocellulosiques. L'hémicellulose contient des pentoses, des sucres qui ne peuvent pas être convertis en éthanol par les organismes habituellement utilisés dans la fermentation. Bien entendu, ce problème nuit fortement à la rentabilité de cette méthode.

Les biocarburants de première génération favorisent le développement de nouvelles techniques, notamment en vue d'augmenter les ressources « mobilisées », y compris celles pouvant être utilisées comme matières premières végétales naturelles pour les raffineries. Ce processus reflète l'importance croissante des biocarburants dans le secteur des transports, fortement dépendant du pétrole. Enfin, les compagnies pétrolières disposent d'un avantage sur ce marché en raison de leur connaissance du secteur des transports (qualité des produits) et de leurs technologies. Certains leaders du secteur investissent massivement dans le développement de techniques de deuxième génération. Plusieurs projets de recherche sont en cours sur le sujet, notamment aux États-Unis et en Europe. L'IFPEN est un acteur majeur de la recherche en France, où il a participé au plan de recherche national sur les bioénergies, ainsi qu'en Europe. Le développement de techniques de production de biocarburants est également étroitement lié aux objectifs de réduction des gaz à effet de serre du secteur du transport. Les évaluations complètes indiquent que l'utilisation de carburants d'origine végétale réduit les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergies fossiles par rapport aux carburants basés sur le pétrole.

## Thierry PRIEM

Directeur du programme Piles à Combustible et hydrogène CEA-LITEN, France

### Stockage de l'hydrogène et piles à combustible, CEA-LITEN, France

Dans le cadre d'une approche durable de l'énergie, l'hydrogène semble être un candidat très prometteur sur les plans électrique et thermique. Toutefois, ce gaz n'existe pas sous sa forme chimique H<sub>2</sub> sur Terre. Il doit donc être produit à partir d'eau, d'hydrocarbures ou de biomasse. De plus, en raison de son caractère gazeux, l'hydrogène nécessite des installations spécifiques pour son transport et son stockage.

### Vue d'ensemble de la chaîne hydrogène

La chaîne hydrogène est décrite de bout en bout dans la figure 1. L'hydrogène est un vecteur énergétique et non une source d'énergie primaire. Il doit être produit à partir d'eau, d'hydrocarbures (principalement du gaz naturel) ou de biomasse. Il doit ensuite être transporté par gazoduc, citerne ou bombonne, puis stocké dans des réservoirs haute pression (200-700 bar), des réservoirs cryogéniques ou des

matériaux hydrures.

Enfin, en tant que vecteur énergétique, l'hydrogène est utilisé dans des moteurs à combustion comme des turbines à gaz ou des réacteurs (moteur Vulcain de la fusée Ariane V) ou dans des piles à combustible produisant électricité et chaleur.

### Production de l'hydrogène

L'un des principaux problèmes liés à l'hydrogène réside dans notre capacité à le produire à partir de techniques durables. En effet, l'hydrogène est actuellement produit à partir d'hydrocarbures, principalement à partir de gaz naturel, qui se reforme en émettant du CO<sub>2</sub>. Pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, il est possible d'utiliser la biomasse afin de produire du biogaz ou du bio-hydrogène.

Une autre méthode, moins développée (environ 4 % de la production mondiale), utilise l'électrolyse : électrolyse chloro-alcaline ou électrolyse de l'eau.

Bien entendu, dans ce dernier cas, il est nécessaire d'utiliser de l'électricité « verte » issue d'énergies renouvelables pour éviter les émissions de CO<sub>2</sub>. Il est également possible d'utiliser de l'électricité issue de centrales nucléaires pour réduire l'empreinte carbone.

Il existe actuellement trois technologies d'électrolyse, à différents stades de développement :

- **Électrolyse alcaline** (température de fonctionnement comprise entre 70 et 100 °C) : disponible commercialement et adaptée à la production de base.
- **Électrolyse à membrane** échangeuse de protons (température de fonctionnement de 80 °C) : commercialisée pour de petites unités et en développement pour les systèmes plus importants. Parfaitement adaptée à la production par intermittence (électricité photovoltaïque ou éolienne).
- **Électrolyse haute température** (température de fonctionnement entre 700 et 1000 °C) : seulement en laboratoire, nécessite une source de chaleur (centrale solaire thermodynamique, centrale nucléaire, centrale de traitement des déchets...), mais offre un meilleur rendement.

**Hydrogène et énergies renouvelables pour le développement durable.** Une fois produit à partir d'énergies renouvelables ou de biomasse, l'hydrogène est principalement utilisé dans des piles à combustible aux applications diverses. Les applications présentées ci-dessous sont les plus prometteuses.

**Utilisation de l'hydrogène pour stocker les énergies renouvelables.** Le principal problème lié aux énergies intermittentes comme le solaire et l'éolien réside dans leur stockage lorsque la production et la demande sont décalées.

L'une des meilleures solutions pour stocker une grande quantité d'électricité consiste à la transformer en hydrogène par électrolyse et à utiliser cet hydrogène dans une pile à combustible pour produire de l'électricité à la demande. Par exemple, le projet MYRTE mené en Corse prouve qu'il est possible d'associer une centrale photovoltaïque à une chaîne hydrogène pour l'écrêtage des pointes (<http://myrte.univ-corse.fr/>).

**Utilisation de l'hydrogène pour lier énergies renouvelables et mobilité.** La mobilité durable constitue également l'un des principaux défis de la gestion énergétique. Les véhicules à hydrogène et pile à combustible constituent une solution très prometteuse en associant moteur électrique et autonomie acceptable (> 500 km). Pour que ces véhicules se développent, il est nécessaire d'implanter des stations à hydrogène, si possible avec de « l'hydrogène vert » issu d'énergies renouvelables. De telles stations, qui produisent de l'hydrogène sur place à partir de panneaux solaires, sont déjà en service en Californie et au Japon.

**Utilisation de l'hydrogène pour produire de l'énergie domestique.** La microgénération basée sur des piles à combustible est déjà une réalité, avec plus de 40 000 unités installées au Japon fin 2012. Toutefois, la source d'énergie actuellement utilisée est le gaz naturel, qui est transformé sur place dans l'unité de microgénération à pile à combustible par reformage interne. Mais à l'avenir, il sera possible d'utiliser directement de l'hydrogène produit localement par électrolyse à partir d'énergies renouvelables.

**L'hydrogène et le marché des piles à combustible, déjà une réalité**

Si l'utilisation de l'hydrogène et des piles à combustible a commencé dans les années 60 avec les programmes spatiaux, leur commercialisation remonte à moins de 10 ans, sur des marchés de niche à forte valeur ajoutée.

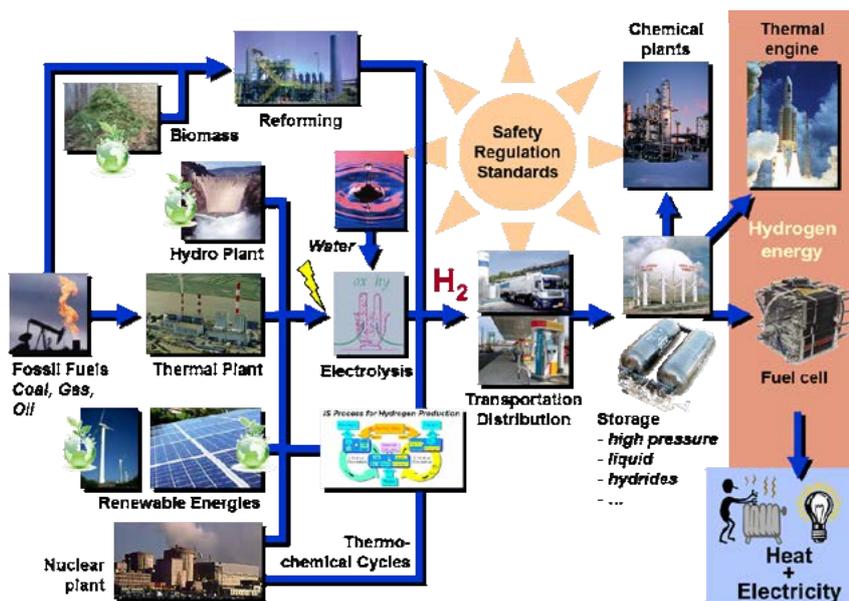


Figure 1 : chaîne hydrogène

Photo credit : IPFEN

Aujourd'hui, les systèmes à pile à combustible sont véritablement compétitifs pour les véhicules de manutention (> 4 000 chariots élévateurs en activité aux États-Unis), les télécommunications, les systèmes de secours et la microcogénération (> 40 000 unités en fonctionnement au Japon). Les évolutions futures seront axées sur la mobilité durable avec l'augmentation du nombre d'autobus et d'utilitaires légers, ainsi que le déploiement d'un réseau de stations à hydrogène.

### L'hydrogène et le marché des piles à combustible, principales difficultés aux horizons 2030/2050

Il reste toutefois quelques difficultés à surmonter pour que le marché de l'hydrogène et des piles à combustible puisse s'ouvrir au grand public :

#### Production de l'hydrogène

- Augmenter la production à faible empreinte carbone (bio H<sub>2</sub>, électrolyse « renouvelable »)
- Réduire le coût de la production de l'hydrogène à moins de 2 €/kg (en particulier par électrolyse)

#### Stockage et distribution de l'hydrogène

- Prouver la sécurité à long terme des modes de

fonctionnement nominal et de défaillance des stations à hydrogène et du stockage embarqué pour la mobilité

- Réduire le coût des réservoirs d'hydrogène (en particulier pour les applications automobiles)
- Harmoniser les normes de déploiement des stations à hydrogène
- Réduire le coût de la distribution d'hydrogène à moins de 4 €/kg

#### Piles à combustible

- Améliorer les performances
- Réduire les coûts de production des systèmes
  - ✓ Véhicules utilitaires lourds : 3 000 €/kW
  - ✓ Applications stationnaires : 750 à 1 500 €/kW
  - ✓ Autocars : 150 à 300 €/kW
  - ✓ Véhicules utilitaires légers : 30 à 50 €/kW
- Augmenter la durabilité
  - ✓ Applications stationnaires : > 40 000 h
  - ✓ Transport : > 5 000 h

## Marie-Christine ZÉLEM

Sociologue, Professeur à l'université Toulouse II, CERTOP-UMR 5044 du CNRS

### De l'intégration socio-technique des énergies renouvelables à leur acceptabilité sociale, CNRS

**A**lors que nos sociétés se sont organisées autour d'une énergie abondante et bon marché, elles sont aujourd'hui confrontées à un changement de paradigme : les énergies fossiles s'épuisent et nos modes de consommation énergétique amplifient le changement climatique et renforcent les inégalités de développement, non seulement entre le Nord et le Sud, mais aussi au sein même de notre société (augmentation de la pauvreté énergétique). Le concept de transition énergétique s'est imposé. Cette réflexion sur la réforme des modes de production et de consommation de l'énergie est l'occasion de promouvoir les énergies renouvelables et les innovations qui leur sont associées.

Les pays européens qui ont soutenu les énergies renouvelables en récoltent aujourd'hui les bénéfices : multiplication des PME, développement de l'emploi et de l'industrie, marchés ouverts, dépendance énergétique réduite, développement local, forte capacité de résistance en cas d'accident climatique ou technique... Certains scénarios énergétiques reconnus aujourd'hui, comme le scénario Négawatt en France qui est basé sur le développement des énergies renouvelables, l'amélioration des technologies d'efficacité énergétique et la généralisation d'une

culture d'économie de l'énergie, prévoient en 2050 une réduction de 2/3 de la consommation énergétique, une forte réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et l'élimination progressive des énergies fossiles et fissiles. La transition énergétique vers une société sobre en carbone impose de reconsidérer nos choix technologiques. Ces choix sont tributaires d'une volonté politique forte et d'une réorganisation des offres du marché, mais également d'un réel changement de la culture de l'énergie.

Aujourd'hui, les systèmes d'exploitation des énergies renouvelables sont plus efficaces et ont fait leurs preuves. Pourtant, ils ne sont encore que peu utilisés. Plusieurs raisons peuvent expliquer cet état de fait, mais la plus importante reste la loi de l'offre et de la demande. Pour être largement utilisée et acceptée, une offre doit être à la fois intéressante et appropriée. Il s'agit de deux critères essentiels qui contribuent à leur tour à l'acceptabilité sociale. Ils constituent une combinaison socio-technique et sont essentiels. Tant que ces deux critères ne sont pas respectés, les technologies restent socialement « inacceptables ». Toutefois, pour expliquer le lent développement des énergies renouvelables, nous tendons à les ignorer, et pensons en conséquence que seuls les consommateurs sont responsables de cet état de fait.

## Obstacles à la diffusion sociale des énergies renouvelables

Comme toutes les technologies commercialisées, les énergies renouvelables sont en concurrence avec d'autres systèmes techniques. Pour avoir une chance, elles doivent présenter des avantages certains sur les autres technologies. Nous pouvons donc adopter une approche déterministe classique pour étudier le développement de ces technologies. Les utilisateurs et territoires sont alors considérés comme faisant preuve de rationalisme économique. On suppose que leur raisonnement les amène à comparer l'intérêt direct de l'acquisition de telle ou telle technologie. Leur choix est lié à l'impact en termes de gains (argent, temps, efficacité, autonomie, image...) ou de satisfaction (éthique, idéologie, énergie économisée ou produite...).

Toutefois, au-delà de ces avantages, plusieurs conditions sont nécessaires pour faciliter le développement d'une technologie quelle qu'elle soit : elle ne doit pas être trop éloignée des cultures techniques, des compétences et des valeurs de la chaîne d'acteurs impliqués dans son installation et sa maintenance. Ces technologies doivent être suffisamment simples pour que les utilisateurs finaux les adoptent. Ces considérations mises à part, la technologie doit être renforcée socialement (par le biais des médias et de l'opinion publique), mais également encouragée par des campagnes de publicité ou des politiques publiques incitatives.

Enfin, il est essentiel que les technologies renouvelables trouvent leur place dans le système énergétique macro-technique. Par exemple, pour la technologie éolienne : passage en revue des plans régionaux, suppression de la régulation ICPE, prix réglementés garantis... Pour le photovoltaïque : simplification administrative, intégration et connexion au réseau, mécanisme de soutien des tarifs, absence de discrimination des technologies de petite taille au sol... Concernant la politique publique, le développement d'industries nationales doit être accompagné par l'établissement d'un cadre légal et financier, et lorsque cela s'avère nécessaire, de protections contre le dumping. Tous ces éléments nécessitent une volonté politique forte, durable et stable afin de sécuriser la chaîne d'acteurs, renforcer les PME du secteur et réduire les incertitudes défavorables aux projets de développement. La diffusion des technologies vertes est une entreprise complexe qui implique de nombreux critères et ne se limite pas à l'acceptabilité sociale.

### Faisabilité et intérêt socio-technique des technologies vertes

En termes d'acceptabilité sociale, seuls les utilisateurs, citoyens et politiques sont responsables de l'adoption ou non des technologies. Cela revient à considérer que seule la dimension sociale joue un rôle dans l'atteinte des objectifs de la technologie.

La réticence à acquérir ou utiliser une technologie verte est liée à une logique systémique. Les contraintes

de l'adoption de certaines technologies ne sont pas seulement d'ordre socio-économique. Elles résultent également des caractéristiques économiques et techniques des technologies concernées. Les premières contraintes sont liées à la concurrence (lobbies). Il est par ailleurs difficile de promouvoir la baisse de la consommation énergétique lorsque la société invite en parallèle à utiliser de plus en plus d'appareils électriques. Les normes techniques et sociales tendent à orienter les pratiques sociales vers plus de confort (température idéale de 23-24 °C, développement des spas et de la climatisation, équipements nombreux, lumière abondante...). Cela se traduit par des injonctions paradoxales (« Essayez d'économiser de l'énergie, mais consommez-en davantage »).

Le problème des petits appareils (chauffe-eau solaire, par exemple) réside dans le fait qu'ils sont souvent conçus sans aucune concertation avec leurs utilisateurs. Leurs créateurs font deux paris : tout d'abord, que l'annonce des performances est suffisante pour convaincre, et ensuite que les clients s'adapteront à l'efficacité prévue. Ils attendent donc d'eux qu'ils s'adaptent à la technologie et qu'ils acceptent, comme un seul homme, les projets énergétiques portés par ces technologies. C'est ici que la faisabilité socio-technique intervient. Elle décrit la capacité d'une technologie à être utilisable et fonctionnelle. Souvent, les conditions d'installation sont mal contrôlées (professionnels), les conditions d'utilisation sont contraignantes et les modes d'emploi ne sont pas suffisants pour rendre les technologies efficaces.

Les pratiques sociales ne créent pas de résistance... Je dirais plutôt que les technologies ne sont pas tout à fait compatibles avec les contextes d'utilisation et les compétences des installateurs et des utilisateurs. Par exemple, l'excès d'éléments techniques, d'automatisation et de paramètres de certaines technologies génère du mécontentement et rebute les utilisateurs. Cela entraîne des problèmes d'intégration sociale.

L'appropriation d'une technologie n'est pas seulement le résultat d'un calcul visant à optimiser l'utilité ou la satisfaction. Il s'agit d'un processus cognitif et technique, basé sur les compétences et connaissances (techniques, mais aussi générales), les idées (valeurs véhiculées par la technique, menaces perçues), les négociations (économiques, familiales, professionnelles), les réseaux sociaux, les médias et les jeux politiques. Les controverses peuvent ainsi se multiplier librement. Pourtant, les énergies renouvelables sont la plupart du temps présentées comme un point clé de la transition énergétique. Cela fait oublier que la technologie ne peut fonctionner que si la dimension sociale est prise en compte.

### Objectif : acceptabilité sociale

Les considérations sociales peuvent être prises en compte, en particulier en ce qui concerne les éléments inacceptables en lien avec les technologies.

Par exemple, dans le domaine du photovoltaïque, l'utilisation de terres au détriment des activités traditionnelles peut fortement limiter le développement de la technologie. En ce qui concerne l'éolien, les perturbations supposées des futurs mâts, leur impact visuel, les craintes sanitaires (risques liés aux ondes) ou l'impact environnemental (flore, oiseaux) peuvent fortement nuire aux projets d'implantation. En règle générale, l'importance des procédures (choix des technologies, création du dossier, suivi des professionnels, caractéristiques de formation, maintenance) ajoute un degré de contrainte qui peut être considéré comme un autre facteur social bloquant. Encore une fois, le processus décisionnel peut être analysé sous la forme d'un calcul visant à éliminer ces obstacles. Le gouvernement ou les autorités locales peuvent intervenir pour inverser la situation par le biais de mesures visant à compenser les contraintes perçues ou réelles.

Le concept d'acceptabilité sociale est extrêmement complexe. Il associe des considérations liées au degré de familiarité et de compréhension des technologies,

à la perception du risque associé au projet (social, sanitaire, électoral, économique et technique), à la connaissance des options alternatives, à l'évaluation des coûts et des bénéfices des solutions recommandées, à la prédisposition des utilisateurs et aux décideurs... Plus que tout, il résulte de la combinaison de deux paramètres clés largement sous-estimés : la façon dont le projet est promu (sur les plans sémantique, politique, technique, économique et social) et le mode de gouvernance.

Les technologies renouvelables ne sont pas que des technologies. Elles ont une dimension sociale dans le sens où leur développement dépend en amont d'un soutien politique et en aval de l'adhésion des groupes cibles. Ainsi, il est préférable de raisonner en termes de faisabilité socio-technique plutôt que d'acceptabilité sociale. Cette expression évoque une responsabilité partagée entre le monde technique et politique d'une part et le monde social d'autre part.

## Christine LINS

Secrétaire exécutive de REN21

### Le statut des énergies renouvelables dans le monde en 2013

Le marché, les industries et les cadres politiques des énergies renouvelables ont évolué rapidement ces dernières années. D'après le rapport « Renewables 2013 Global Status Report », qui est basé sur les données les plus récentes disponibles fournies par un réseau de plus de 500 contributeurs et chercheurs du monde entier, la demande mondiale en énergies renouvelables a continué à augmenter en 2011 et 2012. On estime que les énergies renouvelables ont représenté 19 % de l'énergie consommée dans le monde en 2011 (dernière année pour laquelle des données sont disponibles), dont un peu moins de la moitié provenait de la biomasse traditionnelle.

### Croissance continue des énergies renouvelables

La capacité totale mondiale installée dépassait 1470 GW en 2012, soit une augmentation de 8,5 % par rapport à l'année précédente. La capacité hydro-électrique a augmenté de 3 % à environ 990 GW, alors que les autres énergies renouvelables ont augmenté de 21,5 % pour dépasser 480 GW. À l'échelle mondiale, l'éolien a représenté environ 39 % de la capacité supplémentaire issue des énergies renouvelables en 2012. Il est suivi de l'hydroélectricité et du photovoltaïque, à 26 % environ chacun.

Les énergies renouvelables ont représenté un peu plus de la moitié de la capacité de production électrique supplémentaire toutes sources confondues en 2012.

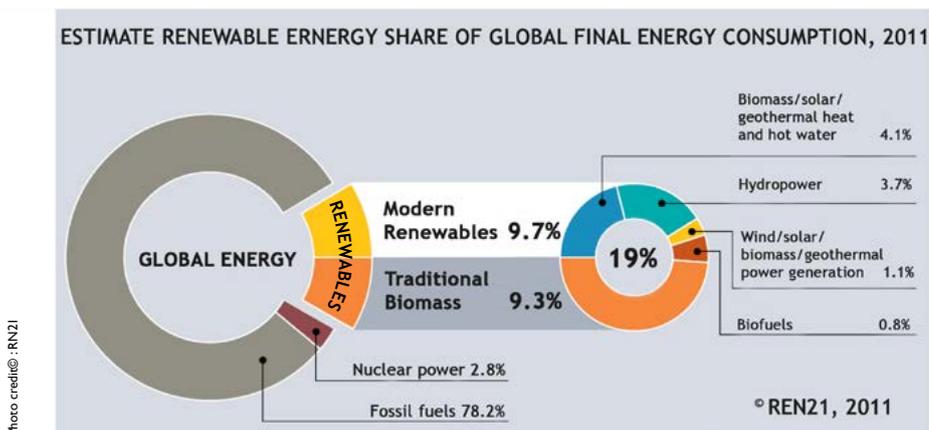
### À propos de REN21

REN21 est un réseau mondial multipartite et stratégique réunissant des organisations internationales, des gouvernements, des associations industrielles, des scientifiques, des universitaires, ainsi que des membres de la société civile qui œuvrent pour une transition rapide vers les énergies renouvelables.

Le siège de REN21 est situé dans les locaux du PNUE, le Programme des Nations Unies pour l'Environnement, à Paris (France). Pour plus d'information : [www.ren21.net](http://www.ren21.net)

À la fin de l'année, elles représentaient plus de 26 % de la capacité mondiale et fournissaient environ 21,7 % de l'électricité mondiale, 16,5 % étant issus de l'hydroélectricité. Les consommateurs industriels, commerciaux et résidentiels deviennent de plus en plus producteurs d'énergies renouvelables dans un nombre croissant de pays.

La demande continue d'augmenter dans le secteur du chauffage et du refroidissement, qui offre un potentiel exceptionnel encore sous-exploité pour le développement des énergies renouvelables. La chaleur issue de sources modernes de biomasse, solaire et géothermique représente déjà une part importante



Source: REN21 Renewables 2013 Global Status Report

Part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie à l'échelle mondiale en 2011.

de l'énergie renouvelable, et le secteur évolue peu à peu, à mesure que les pays mettent en place des politiques de soutien. Le secteur tend à utiliser des systèmes plus imposants et à renforcer l'utilisation de la cogénération, l'intégration de sources de chauffage et de refroidissement renouvelables dans des réseaux locaux, ainsi que l'utilisation de chaleur renouvelable moderne à des fins industrielles.

Après des années de croissance rapide, la production de biodiesel a continué à se développer plus lentement en 2012. La production de carburant à l'éthanol a connu un pic en 2010 avant de décliner. Des quantités réduites mais en augmentation de biocarburants gazeux sont utilisées pour alimenter les véhicules, et il existe un nombre limité d'initiatives visant à lier les systèmes de transport électriques aux énergies renouvelables.

La plupart des technologies liées aux énergies renouvelables ont vu leur fabrication et la demande internationale augmenter en 2012. Toutefois, des environnements politiques incertains et le déclin des politiques de soutien ont nui aux investissements sur certains marchés développés, notamment en Europe, en Chine et en Inde.

Le coût du photovoltaïque et de l'éolien terrestre diminue régulièrement en raison d'économies d'échelle et d'avancées technologiques, mais également de la production d'un surplus de modules et turbines. Combinés à la crise économique internationale et aux tensions continues dans les échanges internationaux, ces développements ont soulevé de nouvelles difficultés pour certains acteurs des énergies renouvelables, en particulier pour les fabricants de matériel, ce qui a entraîné une consolidation du secteur. Toutefois, ces évolutions ont également ouvert de nouvelles opportunités et poussé les entreprises à explorer de nouveaux marchés. Les énergies renouvelables deviennent abordables pour un plus grand nombre de consommateurs dans les pays développés et en développement.

Elles gagnent en puissance en Asie, en Amérique latine, au Moyen-Orient et en Afrique où sont réalisés de nouveaux investissements dans toutes

les technologies. En 2012, la région Moyen-Orient et Afrique du Nord (MENA) et l'Afrique du Sud en particulier ont instauré de nouveaux objectifs ambitieux et de nouveaux cadres politiques. Elles ont par ailleurs connu un fort développement des énergies renouvelables. Les marchés, la production et les investissements se sont davantage tournés vers les pays en développement en 2012.

L'impact de toutes ces évolutions sur les emplois du secteur des énergies renouvelables varie selon les pays et les technologies, mais de manière globale, le nombre de personnes travaillant dans ce secteur a continué d'augmenter. On estime à 5,7 millions le nombre de personnes travaillant directement ou indirectement pour ce secteur dans le monde.

### Un paysage politique en pleine mutation

Fin 2012, au moins 138 pays s'étaient fixé des objectifs en matière d'énergies renouvelables. Début 2013, des politiques de soutien aux énergies renouvelables ont été identifiées dans 127 pays, dont plus des 2/3 sont des pays en développement ou des économies émergentes. La vitesse d'adoption de nouveaux objectifs et politiques est restée limitée par rapport au début des années 2000. Le secteur est plus mature, aussi assiste-t-on davantage à la révision de politiques existantes.

En réponse aux mutations rapides du marché des énergies renouvelables, des budgets nationaux serrés et des conséquences plus globales de la crise économique, certains pays de l'OCDE ont entrepris des révisions approfondies des lois existantes, dont certaines ont été appliquées de manière rétroactive. D'autres pays, principalement des économies émergentes et des pays en développement, ont renforcé leur soutien aux énergies renouvelables. Certains ont même adopté de nouveaux objectifs ambitieux.

La plupart des politiques de soutien aux énergies renouvelables ciblent le secteur de l'électricité, avec des tarifs d'achat et des mesures de diversification du mix énergétique. De plus en plus de pays lancent des appels d'offres pour le déploiement des énergies renouvelables.

Les politiques et objectifs de promotion suivent toujours un rythme plus lent dans le secteur du chauffage et du refroidissement, mais leur adoption augmente néanmoins régulièrement. Début 2013, 20 pays s'étaient fixé des objectifs d'utilisation d'énergies renouvelables pour le chauffage et au moins 19 pays encourageaient l'utilisation de technologies de chauffage renouvelables. Le chauffage et la climatisation renouvelables sont également soutenus par le biais des lois de construction et d'autres mesures.

Des mandats pour l'ajout progressif de biocarburants ont été identifiés dans 27 pays et 27 États/provinces. En dépit d'une pression accrue sur les grands marchés tels que l'Europe et les États-Unis liée au débat sur le bilan global des biocarburants de 1<sup>re</sup> génération à la protection de l'environnement, 49 pays ont lancé des politiques de promotion des biocarburants début 2013.

### Tendances des investissements

Les nouveaux investissements dans les énergies renouvelables et biocarburants se sont montés à 244 milliards de dollars en 2012, soit 12 % de moins que l'année précédente, qui avait établi un record. Cette baisse des investissements, après plusieurs années de croissance, est la conséquence de l'incertitude relative aux politiques de soutien des principales économies développées, en particulier en Europe (baisse de 36 %) et aux États-Unis (baisse de 35 %). Toutefois, si l'on prend en compte les seuls ajouts nets à la capacité électrique (à l'exclusion des centrales de remplacement) en 2012, les investissements dans les énergies renouvelables ont dépassé ceux des combustibles fossiles pour la troisième année consécutive.

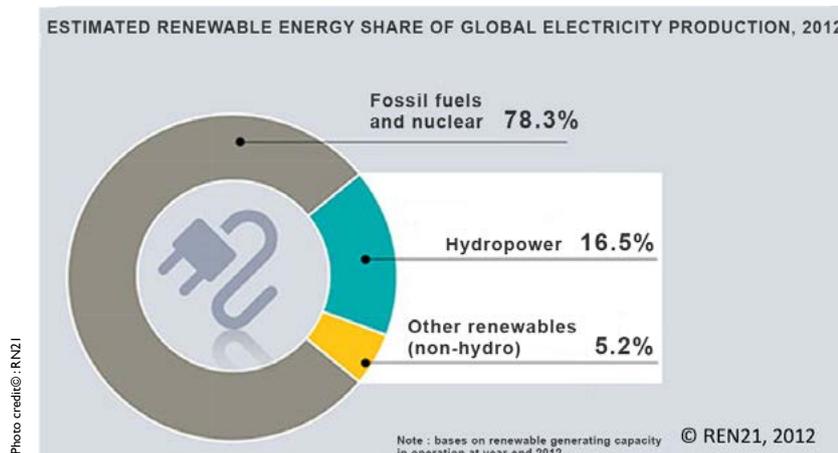
L'année 2012 a marqué l'évolution la plus importante dans le rapport entre les investissements des économies développées et ceux des économies en développement. Les dépenses dans les pays en développement ont atteint 112 milliards de dollars, ce qui représente 46 % des dépenses mondiales totales, contre 34 % en 2011. La tendance entamée il y a 8 ans s'est donc poursuivie. En revanche, les investissements dans les économies développées ont diminué de 29 %

à 132 milliards de dollars, leur niveau le plus bas depuis 2009. Cette évolution est liée aux réductions des subventions pour les projets solaires et éoliens en Europe et aux États-Unis, à un intérêt accru des investisseurs pour les marchés émergents dû à une demande en énergie croissante et à des ressources renouvelables intéressantes, et à la baisse du coût des technologies éoliennes et photovoltaïques solaires.

### Perspectives

L'objectif du Secrétaire général des Nations Unies dans le cadre de l'initiative Énergie durable pour tous est de doubler la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique mondial (passage de 18 % en 2010 à 36 % en 2030). Combinée à une amélioration de l'efficacité énergétique, l'initiative vise la mise en place d'un accès à l'énergie pour tous d'ici 2030. Dans son rapport *Renewables Global Futures*, REN21 a étudié plus de 50 scénarios énergétiques internationaux. Cette analyse montre que l'objectif de l'initiative ne pourra être atteint avec une approche classique. En revanche, il peut devenir accessible, voire même être dépassé avec un cadre politique stable pour l'efficacité énergétique et les sources d'énergie renouvelable.

Maintenant que le secteur des énergies renouvelables s'est développé, les projections sont plus pointues et prennent en compte des décisions politiques potentielles, les restrictions environnementales ou des avancées technologiques importantes anticipées. Toutefois, ces projections n'ont jamais vu juste. Par exemple, dans son scénario [R]évolution énergétique de 2007, Greenpeace avait estimé que la capacité éolienne installée en 2010 atteindrait 156 GW. Alors qu'elle avait jugé son calcul optimiste, l'organisation avait fortement sous-estimé le développement de cette énergie, dont la capacité a en réalité atteint 197 GW. En 2000, l'Agence internationale de l'énergie prévoyait que la capacité éolienne installée se monterait à environ 25 GW en 2010, alors qu'elle a finalement atteint presque 200 GW à la fin de cette même année. En 1997, la Banque mondiale estimait que la capacité éolienne de la Chine serait inférieure à 10 GW en 2020 alors qu'elle s'élevait déjà à 50 GW en 2011.



Part des énergies renouvelables dans la production mondiale d'énergie électrique

Avec la baisse des coûts et l'amélioration des rendements, les énergies renouvelables joueront un rôle de premier plan dans le mix énergétique mondial. Il est ainsi encourageant de voir apparaître des scénarios prévoyant 100 % d'énergies renouvelables pour le milieu du siècle.

### Conclusion

L'avenir des énergies renouvelables est tributaire de motivations diverses, que ce soit la sécurité énergétique, le climat ou le développement. Toutefois, en l'absence de paysage énergétique homogène, la croissance des énergies renouvelables dépend d'un

environnement politique fort. Il est essentiel de mettre en place des politiques intégrées combinant efficacité énergétique et déploiement des technologies vertes. L'intégration des énergies renouvelables dans les systèmes énergétiques augmentera avec la montée en puissance des énergies renouvelables. Une fois les contraintes techniques surmontées, la clé de la progression des énergies renouvelables et d'un futur propre résidera dans l'établissement d'un cadre politique stable.

### Bertrand FRITZ

Chercheur au LHYGES du CNRS, Strasbourg, France

### Jean SCHMITTBUHL

Chercheur à l'IPGS du CNRS, Directeur du LABEX G-Eau-Thermie Profonde, Strasbourg, France

### Albert GENTER

Responsable scientifique chez GEIE, Sultz-sous-Forêts, France

### Jean-Jacques GRAFF

Directeur général d'ES Géothermie, Strasbourg, France

### La géothermie profonde, CNRS, GEIE et ES Géothermie

Nous avons participé à un projet de recherche et de développement lié à la géothermie profonde dans la Vallée du Rhin, dans le cadre du projet pilote EGS à Sultz-sous-Forêts (Alsace), mais également de projets régionaux connexes antérieurs ou actuels, comme le projet ECOGI de Rittershoffen, en France. Nous faisons désormais partie du Labex G-EAU-THERMIE PROFONDE hébergé par l'EOST (Université de Strasbourg) qui est une nouvelle initiative récente sur le long terme (8 ans) des Investissements d'Avenir, visant à soutenir la recherche et le développement de la géothermie profonde en France. Bertrand Fritz est expert de la modélisation des interactions eau-roche. Il dispose d'une longue expérience qui a commencé avec l'un des premiers projets

géothermiques en France, le projet GCRI (Géothermie Cronembourg). Ce projet industriel impliquait le forage d'un puits de 3300 m de profondeur près de Strasbourg, dans le réservoir du Trias inférieur. Malheureusement, il a échoué en raison de l'absence d'exploration profonde à l'époque. Bertrand Fritz a également géré 10 équipes de scientifiques du CNRS participant au projet géothermique de Sultz. Ce projet a initialement été conçu comme un projet de géothermie des roches chaudes sèches (1987) avant de devenir un projet EGS (Enhanced Geothermal System), puis un projet de démonstration qui a commencé à produire de l'électricité en 2008 (1,5 MWe). Jean Schmittbuhl est scientifique au CNRS, expert en géomécanique pour la modélisation de réservoir de géothermie profonde par le biais d'approches analogiques et numériques. Il participe également au contrôle de la sismicité à l'aide d'un réseau de surface et d'instruments souterrains. Il gère le projet Labex (<http://labex-geothermie.unistra.fr/>), qui vise à nouer des partenariats solides entre des universités de recherche et des projets industriels régionaux, en collaboration avec ES Géothermie, et met en place de nouveaux programmes à l'EOST. Albert Genter est ingénieur géologue structuraliste, expert des réservoirs fracturés et de la gestion de projets de géothermie profonde, comme le projet de Sultz. Il contribue à l'exploration géothermique de ressources à haute enthalpie en Martinique (étude de forages géothermiques), en Guadeloupe et à La Réunion (exploration géothermique).



Photo crédit : Fotolia

Albert Genter fait partie du BRGM et assure la responsabilité scientifique du projet de Soultz depuis 2007. Il a été élu en 2013 membre du Comité d'administration de l'International Geothermal Association (IGA). Jean-Jacques Graff dispose de 20 ans d'expérience dans l'encadrement et la gestion de projets. Il a été responsable du projet de géothermie profonde de Soultz pendant 8 ans pour le groupe ES et a créé ES Géothermie en 2007. Il a lancé le projet ECOGI, premier projet français de géothermie profonde après Soultz, et travaille sur la production de chaleur à haute enthalpie pour une entreprise industrielle (Roquette). Il a également fondé le consortium COGEOS entre Électricité de Strasbourg et l'EOST. Il est Vice-président de l'Association Française des Professionnels de la Géothermie (AFPG).

Nous aimerions mettre en avant quelques aspects importants de notre expérience dans l'exploitation de l'énergie issue de la géothermie profonde en France, et notamment du projet de Soultz-sous-Forêts. Ce projet soutenu par la Commission européenne est issu d'une collaboration étroite entre des partenaires scientifiques et industriels de différents domaines (géologie, géophysique, hydrogéologie, géochimie, mécanique des roches et hydraulique) et pays (France et Allemagne en tête, accompagnés de la Suisse, du Royaume-Uni et de la Norvège). Cette coopération s'est poursuivie tout au long du projet de démonstration et reste d'actualité pour les nouveaux projets mis en place dans la Vallée du Rhin. Cette association de la recherche fondamentale et de la recherche appliquée n'est pas si fréquente sur le long terme et reste indispensable pour les développements futurs du secteur.

### Les avantages de la géothermie profonde

Tout d'abord, elle est disponible à tout moment du jour et de la nuit. Elle ne dépend pas du climat. Cette énergie de base peut être produite en continu et régulièrement, ce qui est un avantage certain par rapport au solaire et à l'éolien.

La production d'énergie en géothermie profonde ne nécessite pas une grande empreinte au sol : la surface occupée par la centrale est limitée. Par exemple, la centrale de Soultz-sous-Forêts, qui produit 1,5 MWe, s'étend sur une surface 12 fois moindre que celle nécessaire à une centrale photovoltaïque pour produire la même quantité d'énergie. L'impact visuel et les nuisances sonores d'une centrale de géothermie profonde sont également limités. Ces centrales peuvent donc être installées dans des zones urbaines densément peuplées. Ainsi, environ 40 doublets géothermiques produisent de la chaleur dans de nombreuses zones denses du Bassin parisien depuis des dizaines d'années.

Il s'agit d'une énergie propre lorsqu'elle fonctionne correctement : hormis quelques rares accidents artésiens en Europe, les liquides utilisés dans

la géothermie profonde sont réinjectés dans les structures géologiques après l'exploitation thermique. En effet, ces liquides sont généralement fortement saumâtres et ne peuvent être rejetés en surface. Les tubes et la cimentation des puits géothermiques protègent parfaitement les aquifères peu profonds des risques de pollution. Au vu de la demande énergétique en France, l'exploitation de l'énergie géothermique ne se développera pas de manière homogène dans le pays. Le potentiel géothermique est important, notamment pour les régions d'outre-mer, par exemple en Guadeloupe, où l'exploitation conventionnelle de la géothermie profonde semble être une solution prometteuse pour le remplacement des énergies fossiles (le nucléaire n'y est pas disponible). Ce potentiel augmente maintenant de manière significative en France métropolitaine avec l'EGS basé sur le savoir-faire accumulé à Soultz-sous-Forêts. En effet, l'Alsace suscite un fort intérêt industriel, et une concurrence acharnée s'y livre pour l'obtention de licences d'exploitation de la géothermie à haute température.

### Les limites en France

Tout d'abord, le réservoir géothermique est très profond, ce qui rend difficiles sa caractérisation et les forages. En effet, les conditions géologiques peuvent fortement varier d'un endroit à l'autre, selon le contexte tectonique. La prospection et l'évaluation des ressources du réservoir de géothermie profonde imposent donc a priori des moyens technologiques, humains et financiers importants. Il n'existe pas de technologies efficaces pour l'imagerie haute résolution de la circulation naturelle des eaux profondes, alors qu'elles seraient cruciales pour l'optimisation de l'exploitation. Il est important de savoir comment les technologies matures de gestion des nappes profondes de pétrole seront adaptées à l'eau de géothermie, bien moins coûteuse.

Le coût des projets de géothermie profonde freine leur développement à grande échelle. En effet, le forage est très coûteux et le risque d'échec élevé en raison de l'imprévisibilité des conditions géologiques à grande profondeur. La géothermie profonde constitue donc un pari très risqué.

La sismicité induite représente une autre limite très importante. L'expérience de 2006 réalisée à Basel a déclenché des séismes importants (par rapport à la sismicité naturelle de la région) et montre bien que la gestion de la stimulation du réservoir n'est pas parfaitement maîtrisée. L'impact environnemental, notamment lié à la précipitation de sels minéraux et à la radioactivité des eaux géothermiques circulant dans les roches granitiques, pose également problème.

Enfin, la technologie liée à la circulation dans la boucle géothermique doit faire l'objet de sérieuses améliorations.

Il est nécessaire de mettre au point des pompes adaptées aux liquides fortement corrosifs, en particulier pour les configurations à arbre long. La Guadeloupe et le Nord de l'Alsace sont les deux seules régions dans lesquelles des centrales géothermiques produisent de l'électricité en 2013. Toutefois, des prospections sont en cours dans d'autres régions françaises : Massif Central, Vallée du Rhône, Pyrénées et île de la Réunion. De nouveaux projets sont également en cours de développement. Ils abordent la géothermie profonde sous un autre angle, en la considérant d'abord comme une source de calories. C'est le cas du nouveau projet ECOGI (Rittershoffen, Alsace). La société Roquette s'est ainsi associée au groupe ES et à la Caisse des Dépôts pour utiliser les calories uniquement par le biais d'un échangeur thermique devant chauffer un grand volume d'eau douce dans une optique industrielle. Ce projet innovant extraira de la Terre environ 25 MWth, ce qui est comparable aux 2 MWe de la centrale pilote de Soultz-sous-Forêts, pour laquelle l'énergie thermique associée n'est pas encore exploitée.

### Géothermie profonde et gaz à effet de serre

L'exploitation de la géothermie profonde ne produit que peu de carbone. Bien entendu, dans le contexte énergétique actuel de domination de l'énergie nucléaire en France métropolitaine, l'impact de la géothermie profonde restera limité. Toutefois, dans les régions d'outre-mer comme la Guadeloupe et La Réunion, où les énergies fossiles dominent, la situation est nettement différente. En Guadeloupe, 130 000 tep d'énergie géothermique permettent d'éviter le rejet de 400 000 tonnes de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

L'utilisation de la géothermie pour les besoins caloriques industriels importants constitue un défi passionnant pour l'avenir et une solution potentielle de réduction des rejets de carbone dans l'atmosphère.

### Les difficultés à surmonter

La géothermie constitue clairement une source d'énergie potentielle. Il s'agit d'une énergie renouvelable dont l'empreinte carbone est faible. Toutefois, son développement nécessite une prospection importante des sols souterrains pour localiser les régions les plus propices, qui disposent de grands réservoirs énergétiques. La prospection des nappes pétrolifères dure depuis des années et n'est toujours pas terminée. Il est essentiel de savoir si cette prospection sera adaptée aux réservoirs de géothermie profonde de manière suffisamment économique pour promouvoir un large développement de cette technologie.

En raison du rendement relativement faible (10-15 %) de la production électrique par la géothermie profonde, il est important d'étudier de manière systématique la possibilité d'une utilisation industrielle de la perte

thermique (cogénération). Une autre difficulté importante consiste à optimiser le développement d'échangeurs profonds (> 3 000 m) pour contrôler les risques associés à leur développement (stimulation) et assurer le contrôle de leur durée de vie. L'une des difficultés scientifiques actuelles réside dans les connaissances insuffisantes des flux circulant dans les médias fracturés. Il est important de mieux comprendre les différentes interactions eau-roche pendant la stimulation à court terme et lors du vieillissement du réservoir (long terme). Il convient également de porter une attention particulière à l'amélioration des mouvements parasismiques au sein du réservoir afin de contrôler efficacement la sismicité induite. Nous devons aussi obtenir des données haute résolution sur l'évolution des propriétés thermiques, hydrauliques et mécaniques de l'échangeur profond dans le temps et développer des moyens d'ingénierie permettant de maintenir les caractéristiques souhaitées de l'échangeur.

### Perspectives aux horizons 2030 et 2050

En dépit des avancées significatives réalisées au cours des dernières années, nous pensons que le développement de l'exploitation de la géothermie profonde est actuellement limité par une connaissance insuffisante des structures aquifères profondes (> 1000 m) et de leurs propriétés. Les avancées majeures à venir dépendent de trois types d'études scientifiques :

- **Production de données de haute qualité** relatives aux structures principales des réservoirs géothermiques à des échelles spatiales et temporelles adaptées dans un contexte similaire à celui de la Vallée du Rhin, principalement par le contrôle et l'acquisition intensifs de données.
- **Modélisation des processus** impliqués dans la stimulation du réservoir et dans son évolution à court et long termes (de quelques minutes à plusieurs décennies).
- **Évaluation des nuisances environnementales** liées à l'activité géothermique à long terme (précipitation de sels minéraux, radioactivité naturelle, empreinte CO<sub>2</sub>, optimisation de l'utilisation de la chaleur, etc.).

### Recommandations pour un déploiement à grande échelle des énergies renouvelables

Deux axes de travail permettront de renforcer l'intérêt de la géothermie profonde : le développement de nouveaux outils géophysiques spécifiquement conçus pour l'exploration en géothermie profonde et la réduction des coûts de forage grâce à de nouvelles technologies. Ces évolutions s'appuieront sur un démonstrateur industriel de premier plan qui bénéficiera de l'expérience acquise dans le cadre du projet de la centrale pilote de Soultz-sous-Forêts.

## Frank Haugwitz,

Directeur, Asia Europe Clean Energy Advisory (AECEA) Co. Ltd.

### Développement des énergies renouvelables en Chine, AECEA

Le 1<sup>er</sup> janvier 2013, l'agence nationale de l'énergie chinoise a annoncé avec près de deux ans de retard le 12<sup>e</sup> plan quinquennal (2011-2015) chinois de développement énergétique. Ce plan souligne la nécessité d'exploiter des ressources énergétiques stables et durables et de s'engager sur un chemin plus respectueux de l'environnement. Ce dernier point a incité l'agence à mettre la priorité sur le développement d'énergies non fossiles. Le plan, qui couvre plusieurs sous-domaines (électricité renouvelable, biomasse, gaz naturel, charbon, etc.), définit des objectifs obligatoires et indicatifs. La Chine a prévu d'investir jusqu'à 2,17 milliards de dollars d'ici 2015. Des extraits du plan sont présentés ci-dessous.

Fin 2013, plus de 20 % de l'électricité produite (1 milliard de kWh) provenaient d'énergies renouvelables, ce qui représente environ 10,6 % (équivalent charbon) de la consommation d'énergie finale. La capacité cumulée de production d'énergie renouvelable installée (hydroélectricité à grande échelle incluse) atteignait 378 GW, soit environ 30 % de la capacité totale de production d'énergie installée.

En 2013, la capacité totale de production d'hydroélectricité installée en Chine atteignait 280 GW. Avec 92 GW environ, l'éolien est depuis 2012 la deuxième source d'énergie renouvelable du pays, derrière l'hydroélectricité et devant le nucléaire. Pour la seule année 2013, 16,1 GW supplémentaires de capacité de production éolienne ont été installés, soit une augmentation de 3,1 GW par rapport à l'année précédente.

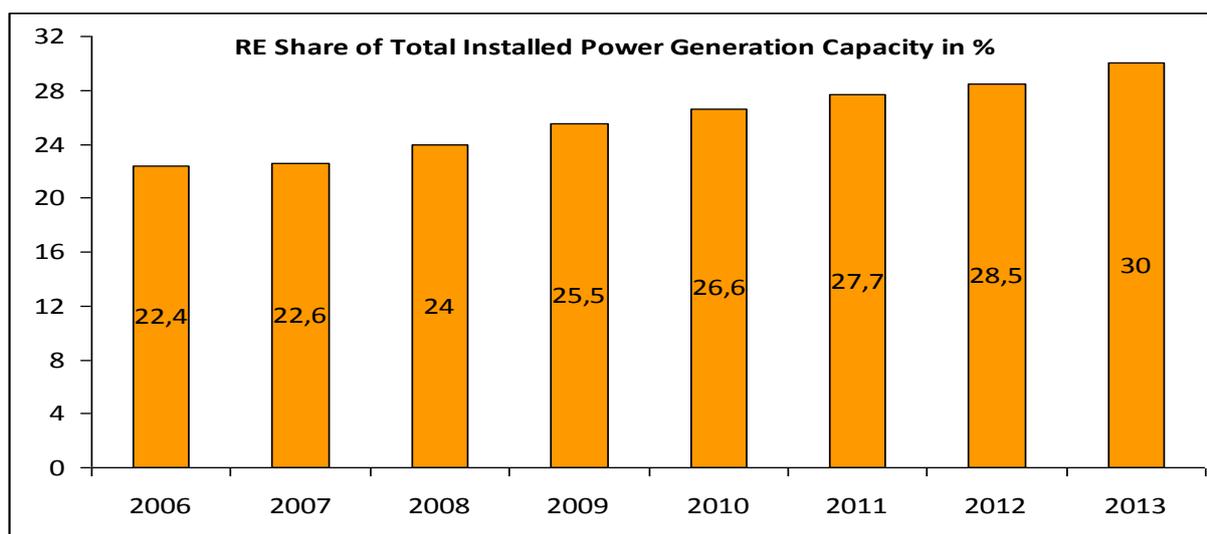
Category	Indicator	Unit	2010 Value	2015 Target	Annual Change	Type
Quantity of Energy Consumed and Efficiency	Share of Non-Fossil Fuels	Percent of total	8.6%	11.4%	4.3%	Indicative
Energy Production and Supply	Non-Fossil Energy Production Capacity	Mtce	280	470	10.9%	Indicative
Improvement in People's Livelihood	Green Energy Demonstration Counties	Number	108	200	13.1%	Indicative
Hydro Power Capacity	--	GW	220	290	5.7%	Indicative
Wind Power Capacity	--	GW	31	100	26,4%	Indicative
Solar Power Capacity	--	GW	0.86	21*	89.5%	Indicative
Biomass Power Capacity	--	GW		13		Indicative

La capacité totale de production d'électricité installée en Chine s'élèvera à 1490 GW d'ici 2015, l'essentiel de la nouvelle capacité provenant d'énergies renouvelables, du nucléaire et du gaz. Par ailleurs, les énergies renouvelables satisferont 11,4 % de la demande d'énergie finale chinoise contre 11,1 % fin 2014.

Face aux niveaux de pollution sans précédent auxquels la Chine est confrontée, le centre national des énergies renouvelables est arrivé fin 2013 à la conclusion que la voie énergétique poursuivie au cours des 10 dernières années n'était pas tenable. Il a également reconnu que la croissance économique devait à l'avenir s'appuyer sur la durabilité et des solutions environnementales saines. Dans ce contexte, les énergies renouvelables sont indispensables et doivent jouer un rôle beaucoup plus important que par le passé. Perçues comme des « solutions propres, vertes, respectueuses du climat et sobres en carbone », les énergies renouvelables disponibles au niveau local revêtent une importance stratégique pour le futur système énergétique de la Chine.

Ces dernières années, l'énergie éolienne s'est limitée à 11 % en moyenne, mais elle a atteint jusqu'à 20 % dans certaines provinces telles que le Jilin et l'est de la Mongolie intérieure. Au total, environ 21 GW de projets éoliens ont été soumis à un appel d'offres, près de deux fois plus qu'en 2012. Si le développement de projets éoliens terrestres est plutôt satisfaisant, le déploiement de l'éolien off-shore est relativement lent, avec tout juste 300 MW en exploitation et environ 100 MW en construction fin 2013. Beaucoup pensent que la Chine n'atteindra pas les 5 GW d'éolien off-shore qu'elle s'est fixés avant l'arrivée à échéance du 12<sup>e</sup> plan quinquennal (2011-2015). En revanche, elle dépassera très probablement les 100 GW terrestres à l'horizon 2015.

Fin 2013, la capacité totale de production de biomasse installée avoisinait les 8,5 GW et incluait la combustion directe de la biomasse agricole et forestière, l'incinération des déchets, la production de biogaz, la production d'énergie par gazéification des boues et de la biomasse, ainsi que la production d'énergie à partir de la bagasse.



Capacité totale de production électrique installée

Le développement de la production d'énergie à partir de la biomasse devrait rester lent, principalement en raison de la disponibilité limitée de biomasse appropriée. La mise en place en 2008 de subventions pour la fabrication de briquettes de paille a conduit à la production de près de 600 millions de tonnes en 2013. La production chinoise de biocarburants s'élevait à environ 210 millions de tonnes de bioéthanol, à partir de biomasse hors graines.

### Rôle du solaire photovoltaïque dans le mix énergétique chinois

En janvier 2014, les installations solaires photovoltaïques en Chine représentaient environ 21 GW, soit une installation annuelle record de 13 GW qui a permis à la Chine de prendre la tête du marché, devant le Japon et les États-Unis en 2013. Entre 2010 et 2013, environ 80 % des installations solaires photovoltaïques étaient concentrées à l'ouest du pays.

d'achat ont notamment été publiés fin août 2013 et ont pris effet en janvier 2014 pour une durée de 20 ans.

Début février 2014, l'agence nationale de l'énergie a annoncé que sur les 14 GW à installer au cours de l'année, au moins 8 GW devraient être issus de projets « solaires photovoltaïques distribués ». Face à la grande complexité et aux fortes contraintes liées à ces projets observées dans les mois qui ont suivi, il a semblé évident qu'en l'absence d'amélioration de la réglementation, il serait impossible de faire 10 fois mieux que l'année précédente (au cours de laquelle seuls 800 MW de projets solaires photovoltaïques distribués ont été réalisés) comme cela était prévu. Dans ce contexte, l'agence nationale de l'énergie a organisé des rencontres régulières avec les représentants des secteurs industriels et financiers au cours du semestre afin de comprendre comment ces obstacles pourraient être surmontés.

	12 <sup>th</sup> Five-Year-Plan Period (2011 – 2015)					Air Pollution Prevention Action Plan 2014 – 2017	13 <sup>th</sup> Five-Plan Period 2016 – 2020 (Draft)
	March 2011	April 2011	Dec 2011	Sept 2012	Jan 2013	2014/06	2014/08
Time of Announcement							
GW	5	10	14	20	35	70	100
Share btw Distributed & Utility-Scale in GW	--	--	--	--	20 + 15	35 + 35	--

Objectif du 12<sup>e</sup> plan quinquennal

Cette région se caractérise par une densité de population, un développement économique et une consommation d'énergie faibles. Elle impose donc un transfert longue distance vers les provinces orientales plus développées le long des côtes, ce qui a incité le gouvernement central à annoncer des mesures en faveur du solaire photovoltaïque distribué. Des tarifs

Le 2 septembre 2014, elle a finalement publié la mise à jour tant attendue de la politique sur le solaire photovoltaïque distribué, destinée à résoudre les problèmes les plus épineux qui empêchaient la bonne réalisation de ce type de projet. La « nouvelle politique » est jugée suffisamment complète et détaillée pour permettre une accélération sensible du développement des projets.

Les responsabilités applicables ont été identifiées et attribuées en conséquence. L'accent porté sur la qualité et la volonté de mettre en place un système national de surveillance et de rapports exercent certainement une pression supplémentaire sur les développeurs et incitent, par exemple, les prestataires de services en ingénierie, approvisionnement et construction à s'assurer que les systèmes installés sont hautement performants sur le long terme. Le développement des politiques de soutien financier à tous les niveaux administratifs prôné par l'agence nationale contribuera certainement à renforcer la viabilité financière des projets et à stimuler la demande. Plus globalement, la transparence favorise le développement durable des marchés.

L'Agence internationale de l'énergie (AIE) a estimé que la capacité de production installée pour cette énergie atteindrait 2100 GW, soit environ 21 % du mix total de production d'énergie.

Comparé au solaire photovoltaïque, le solaire à concentration en est encore au stade embryonnaire. Un premier projet de concession pour la construction d'une centrale de 50 MW dans la province du Qinghai a été lancé en 2013. L'agence nationale de l'énergie envisage toutefois de stimuler le développement de ces projets par le biais d'appels d'offres. En parallèle, le déploiement de chauffe-eau solaires a porté la surface des panneaux solaires à 317 millions de m<sup>2</sup>, propulsant la Chine à la première place mondiale.

	2015	2020	2030	2050
<b>Photovoltaic (BAU Scenario) in GW</b>	<b>35</b>	<b>100</b>	<b>400</b>	<b>1000</b>
<b>Photovoltaic (Optimistic Scenario) in GW</b>	<b>35</b>	<b>200</b>	<b>800</b>	<b>2000</b>

Feuille de route des énergies renouvelables à l'horizon 2050

### La Chine vise au moins 100 GW de solaire photovoltaïque à l'horizon 2020

Aujourd'hui, un peu plus d'un an avant l'entrée en vigueur du 13<sup>e</sup> plan quinquennal (2016-2020), l'agence nationale de l'énergie réfléchit déjà à un objectif possible pour le solaire photovoltaïque. Dans ce contexte, les premières informations ont été publiées et à ce jour, l'agence nationale de l'énergie vise une capacité de production d'énergie solaire photovoltaïque minimum de 100 GW d'ici 2020. Les derniers développements, qui laissent présager une augmentation de la part du solaire photovoltaïque installé, joueront certainement un rôle capital lors de la finalisation du ratio entre l'énergie commerciale et l'énergie distribuée.

La capacité de production d'énergie solaire photovoltaïque a quant à elle affiché une croissance inattendue de 89,5 %. Les objectifs ont donc été revus à la hausse dès mars 2011, passant de 5 GW à 35 GW aujourd'hui.

Au-delà du 13<sup>e</sup> plan quinquennal (2016-2020), l'agence nationale de l'énergie a chargé en 2013, le centre national chinois des énergies renouvelables de développer la feuille de route chinoise des énergies renouvelables à l'horizon 2050. Les objectifs de cette feuille de route sont présentés ci-dessous.

Dans les années et les décennies à venir, le rôle du solaire photovoltaïque dans le mix énergétique chinois ne peut qu'augmenter. Lors d'un webinaire qui s'est déroulé le 29 septembre 2014,

Bien que la Chine s'appuie de plus en plus sur un système énergétique durable, il reste encore beaucoup d'obstacles à franchir, notamment institutionnels.

Selon le centre national des énergies renouvelables, il est en effet difficile face à ces obstacles de créer un système d'alimentation en énergie suffisamment flexible pour intégrer plus efficacement les énergies renouvelables. Il a par ailleurs reconnu que la qualité et la compétitivité économique des énergies renouvelables nécessitent davantage d'efforts et que de manière générale, les mesures d'incitation appropriées doivent être mises en place pour garantir un déploiement durable des technologies des énergies renouvelables.

#### Informations complémentaires :

Dans une nouvelle tentative pour lutter contre la pollution atmosphérique que subit la Chine, la commission nationale du développement et des réformes (NDRC) a approuvé en mars de cette année un plan 2014-2017 de prévention de la pollution atmosphérique. Ce plan, qui a pris effet début mai 2014, se concentre sur le secteur de l'électricité et fixe divers objectifs concernant par exemple la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, l'extension du réseau, la consommation de charbon, etc. Il fixe les objectifs suivants :

Capacité de production hydroélectrique : 330 GW  
 Capacité de production éolienne : 150 GW  
 Solaire photovoltaïque : 70 GW (35 GW commerciaux + 35 GW distribués)  
 Biomasse : 70 millions de tonnes équivalent-charbon

**Biswajit Ghosh,**

*École des études sur l'énergie, Université de Jadavpur, Kolkata, Inde et Professeur invité, Université de Newcastle, Royaume-Uni*

### **Les technologies énergétiques propres en Inde, Ecole des études sur l'énergie, Université de Jadavpur**

Le développement économique d'un pays est étroitement lié à l'augmentation de la consommation d'énergie, qui s'appuie généralement sur des ressources fossiles. L'augmentation de la consommation d'énergie entraîne donc une augmentation des émissions de gaz à effet de serre, qui constituent à présent un problème mondial. L'accès aux combustibles fossiles est soumis à diverses contraintes : i. Disponibilité : selon la situation géologique, ii. Accessibilité : selon la situation géopolitique, iii. Coût : selon les conditions économiques et iv. Acceptabilité : selon les restrictions environnementales et sociales.

Un accès approprié aux sources d'énergie renouvelable permet de s'affranchir de ces contraintes et de garantir la sécurité énergétique tout en réduisant le poids des gaz à effet de serre. Les efforts requis pour améliorer l'accessibilité aux sources d'énergie renouvelable contribuent à la sécurité énergétique, et au développement durable. Par ailleurs, une utilisation appropriée des sources d'énergie renouvelable permet d'améliorer l'accessibilité des communautés des pays en développement aux services énergétiques modernes, ce qui est essentiel pour atteindre les objectifs de développement durable fixés par les Nations Unies.

Le développement durable répond aux préoccupations concernant les relations entre l'homme et la nature. Traditionnellement, le développement durable suivait un modèle à trois piliers (économie, écologie et responsabilisation), qui permettait une organisation schématique des objectifs de développement. Ces trois piliers sont interdépendants et se renforcent mutuellement. Dans un autre cadre conceptuel, le développement durable peut suivre une orientation située entre les deux paradigmes de durabilité faible et durabilité forte. Ces paradigmes diffèrent de par leurs hypothèses sur la substituabilité du capital naturel et du capital artificiel. Les énergies renouvelables peuvent contribuer aux objectifs de développement du modèle à trois piliers en préservant le capital naturel.

L'utilisation d'énergies renouvelables offre la possibilité de contribuer à un grand nombre d'objectifs de développement durable importants, à savoir i. Développement social et économique ; ii. Accès à l'énergie ; iii. Sécurité énergétique ; iv. Atténuation du changement climatique et v. Réduction de l'impact sur l'environnement et la santé. L'atténuation des changements climatiques anthropiques dangereux est perçue comme un facteur déterminant du développement des énergies renouvelables dans le monde.

Ce document présente une initiative indienne visant à faciliter l'accès aux sources d'énergie renouvelable pour atteindre les objectifs de développement durable.

### **Situation énergétique de l'Inde**

L'Inde est le 7<sup>e</sup> pays au monde en termes de superficie et le 2<sup>e</sup> en termes de population. Le pays compte aujourd'hui environ 1,2 milliards d'habitants dont l'espérance de vie est de 65 à 66 ans et affiche un produit intérieur brut (PIB) d'environ 1844 dollars par habitant et par an. La consommation d'électricité annuelle par personne est relativement faible, de l'ordre de 706 kWh. La capacité totale de production d'électricité du pays s'élève à environ 237 742 MW avec une perte de transmission de l'ordre de 20-23 %. La production captive du pays, qui s'établit autour de 39 375 MW, est principalement utilisée par le secteur industriel. 83 % de la production totale vont aux secteurs urbains et 17 % aux secteurs ruraux. La part de l'électricité thermique se monte à environ 68 %, avec une consommation de charbon de 600 à 650 g/kWh et des émissions de CO<sub>2</sub> de 1,2 à 1,1 kg/kWh. L'Inde a dévoilé et lancé son plan d'action national sur le changement climatique (NAPCC) en 2008. Guidé par les principes du développement durable, ce plan harmonise les objectifs environnementaux et économiques et favorise la participation et la coopération internationale en matière de recherche, développement, partage et transfert de technologies. Il s'appuie sur des financements externes et un régime international de droits de propriété intellectuelle applicable à ces transferts des technologies. Le NAPCC propose une nouvelle orientation qui soutient les objectifs de développement tout en permettant une gestion efficace du changement climatique. Pour instaurer un mécanisme propre et sécurisé pour la production d'électricité, le gouvernement indien a également instauré la mission solaire nationale Jawaharlal Nehru (JNNSM), nommée ainsi en l'honneur du 1<sup>er</sup> Premier ministre du pays.

Cette initiative majeure est mise en œuvre par le ministère des Energies nouvelles et renouvelables en coopération avec tous les gouvernements des états indiens afin de traiter les problématiques actuelles liées à la sécurité énergétique de l'Inde tout en assurant une croissance écologiquement durable. La mission solaire représente une large part de la contribution du pays aux efforts internationaux entrepris pour lutter contre le changement climatique.

Outre la JNNSM, le ministère des Energies nouvelles et renouvelables a pris plusieurs initiatives, telles que le VESP (Village Energy Security Programme), le RVEP (Rural Village Energy Security Programme) et le Solar Home Lighting Systems (SHLS), en coopération avec les gouvernements des états. Grâce à ces mesures, le déploiement des énergies renouvelables a trouvé un nouvel élan, mais plusieurs problèmes tels que les coûts élevés de production, le manque de mécanismes de financement et les retards institutionnels font encore obstacle à un développement plus large. La commission de planification, principal organe du gouvernement indien chargé de formuler des politiques complètes, a identifié un besoin urgent de mesures politiques dans ce domaine. Elle a donc mis l'accent sur la nécessité d'investir dans les énergies renouvelables pour atteindre les objectifs durables du 12<sup>e</sup> plan quinquennal (2012-2017) national.

Parallèlement à sa collaboration avec les gouvernements des états, le ministère des Energies nouvelles et renouvelables a instauré six autres organisations pour la mise en œuvre des programmes et technologies des énergies renouvelables : i. National Institute of Solar Energy, ii. National Institute of Wind Energy, iii. Alternate Hydro Energy Centre, iv. Sardar Swaran Singh National Institute of Renewable Energy, v. Indian Renewable Energy Development Agency (IREDA) et vi. Solar Energy Corporation of India (SECI). Chaque organisation s'est vu confier des objectifs et des missions spécifiques. La SECI prend les mesures nécessaires à la mise en œuvre de la JNNSM. Elle se charge de la planification de projets de production d'énergie solaire à grande échelle, destinés à assurer la sécurité énergétique de l'Inde en s'appuyant sur des technologies plus vertes. La mise en œuvre de la JNNSM se déroule en trois étapes. La première étape a été consacrée à la promotion de l'énergie solaire hors réseau dans les zones rurales éloignées, complétée par des systèmes intégrés au réseau de petite capacité. Lors de la deuxième étape, les efforts se sont concentrés sur les systèmes intégrés au réseau à petite échelle et à la mise en place d'un parc solaire. La dernière étape sera consacrée à la pénétration à grande échelle de l'énergie solaire dans les systèmes centralisés et distribués.

### Énergie solaire photovoltaïque en Inde

L'exploitation de l'énergie solaire dépend du rayonnement solaire dans le pays. Selon des études et des mesures détaillées, le rayonnement solaire entrant (ensoleillement) moyen en Inde varie entre 4,5 et 6,2 kWh/m<sup>2</sup>/jour, avec environ 300 jours d'ensoleillement par an. Les états du Rajasthan et du Gujarat, à l'ouest du pays, bénéficient des conditions les plus favorables, avec 5,5-6,2 kWh/m<sup>2</sup>/jour environ. Ils constituent donc des sites de choix pour les développeurs nationaux et internationaux qui souhaitent réaliser des projets d'énergie photovoltaïque de grande capacité intégrés au réseau. Parallèlement aux projets individuels de la JNNSM, on assiste à l'émergence de parcs solaires développés par les gouvernements des états, dont le parc de 500 MWp du village de Charanka, dans le district de Pathan (nord du Gujarat). Le gouvernement local a attribué les terrains requis aux développeurs du projet et la société de distribution d'énergie a acheté l'énergie produite par le parc à un prix convenu entre les parties au contrat. Chaque développeur a installé sa centrale solaire et bénéficie d'un accord d'exploitation sur 25 ans conclu avec le gouvernement. Ce dernier a ainsi organisé la location de terrains sur la base de 5 acres/MWp pour les modules photovoltaïques au silicium monocristallin ou polycristallin et de 7,5 acres/MWp pour les modules photovoltaïques en couches minces. À ce jour, 17 développeurs contribuent à ce parc solaire, dont la capacité totale installée atteint 221 MWp. La participation d'autres développeurs lors de la dernière étape devrait porter la capacité à 500 MWp, faisant ainsi de ce parc le plus grand parc solaire mondial. Chaque développeur pourra installer une capacité comprise entre 5 et 25 MWp. Tous ont conclu avec le gouvernement et la société de distribution d'énergie du Gujarat un contrat qui fixe le prix d'achat de l'énergie photovoltaïque à 15 roupies (0,4 dollar) par kWh les 12 premières années et 5 roupies (0,12 dollar) les 13 années restantes. L'installation des centrales s'est terminée fin 2011 et toutes ont commencé à exporter de l'énergie vers le réseau de la GETCO (Gujarat Energy Transmission Corporation) début 2012.

Réseau	Capacité (MW)	Hors réseau	Capacité (MW)
Energier éolienne	21 997.00		
Energie solaire	2766.00		
Cogénération basée sur la bagasse	2689.00	Cogénération basée sur la biomasse	556.00
Energie basée sur la biomasse	1365.00	Gazéification de la biomasse à l'échelle industrielle	149.00
		Gazéification de la biomasse à l'échelle rurale	17.00
Energie issue des déchets	103.00	Energie issus des déchets	136.00
Total	32 780.00	Total	858.00

Source : Ministère indien des Energies nouvelle et renouvelables : [www.mnre.gov.in](http://www.mnre.gov.in)

Outre ce parc solaire, de nombreuses autres centrales de production d'énergie photovoltaïque intégrées au réseau ont vu le jour dans différents états, pour une capacité totale de 2766 MWp environ.

### Autres énergies renouvelables en Inde

Les installations éoliennes ont également fortement progressé en Inde. Bien que les vents dépendent fortement des sites, la côte indienne offre des sites parfaitement adaptés aux applications éoliennes. Parmi toutes les sources d'énergie renouvelable, l'éolien contribue largement à la capacité installée. D'après une évaluation, le potentiel éolien de l'Inde s'établit autour de 102 778 MW à 80 mètres de hauteur pour une disponibilité des terres de 2 %. Si ce potentiel était totalement exploité, l'éolien ne répondrait qu'à 8 % de la demande d'électricité projetée pour 2022 et 5 % pour 2032. La capacité totale installée actuelle est de 21 997 MW.

L'Inde a par ailleurs fortement investi dans la production d'hydroélectricité à petite échelle, à hauteur de 3 857 MW. D'autres énergies renouvelables telles que la biomasse ont également intégré le mix énergétique indien. Les secteurs industriels se sont quant à eux intéressés à l'utilisation de sources d'énergie renouvelable pour réaliser des économies d'énergie. Pour limiter la consommation de carburant diesel dans leur système de production captive, des acteurs du secteur agroalimentaire indien tels que les rizeries et les raffineries de sucre ont intégré des systèmes de gazéification de la biomasse dans leurs générateurs diesel traditionnels. Les rizeries et les raffineries de sucre étant les sources captives

de déchets de biomasse, elles ont révélé le rôle que les énergies renouvelables pouvaient jouer dans les économies d'énergie. Le tableau ci-dessous contient des informations détaillées sur les installations d'énergies renouvelables en Inde intégrées au réseau et hors réseau.

Selon des études, l'utilisation des sources d'énergie renouvelable permet à l'Inde de progresser sur la voie de l'objectif d'une énergie durable pour tous. L'exploitation des énergies renouvelables s'est traduite par une diminution sensible des émissions de CO<sub>2</sub>. Un simple calcul permet de déterminer que la capacité actuelle de production d'énergie renouvelable a permis de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> d'environ 6,38 x 108 tonnes par an. Ce calcul indique également qu'avec un facteur d'utilisation moyen de 20 % de la capacité de production d'énergie renouvelable, la production annuelle totale d'électricité correspondant à cette capacité serait de 5,8 x 1010 kWh.

Selon le rapport disponible, les émissions de CO<sub>2</sub> par kWh d'électricité produite par une centrale à charbon avoisinent 1,0-1,1 kg, tandis que les projets centrés sur les énergies renouvelables évoqués ci-dessus réduisent les émissions totales de CO<sub>2</sub> de 6,38 x 108 tonnes par an.

Outre ces avancées positives, la mise en œuvre de projets centrés sur les énergies renouvelables a créé de nombreux emplois dans tous les secteurs et ouvert la voie à un accès universel grâce à la modernisation de services énergétiques. Tous ces éléments ont largement contribué à l'amélioration de l'indice de développement humain (IDH) de 14 à 16 % dans la zone dans laquelle ils sont mis en œuvre.

## Humberto GÓMEZ MEIER,

*Institut de chimie, Université pontificale catholique, Valparaíso.*

## Patricio VALDIVIA LEFORT,

*Centre des études énergétiques, Corporación de Fomento de la Producción (CORFO).*

### L'énergie solaire photovoltaïque au Chili, Université pontificale catholique, Valparaíso et CORFO

#### Introduction

**95** % des Chiliens vivent au-dessus du 42<sup>e</sup> parallèle sud, dans des zones présentant un potentiel solaire élevé. Le rayonnement solaire horizontal moyen sur un an des régions chiliennes situées au nord de la région de Maule (à 300 km au sud de Santiago) se situe autour de 3000 à 4200 kWh/m<sup>2</sup> par jour. Il s'agit de l'une des zones présentant le plus grand potentiel solaire au monde, ce qui y rend le développement de l'énergie solaire photovoltaïque très attractif. Le désert d'Atacama, dans le nord du Chili, est particulièrement intéressé

sant à cet égard, car c'est l'une des régions les plus arides et les plus ensoleillées de la planète. Ce désert présente des conditions optimales pour la production d'énergie solaire photovoltaïque, avec un rayonnement solaire élevé, une faible humidité et un ciel dégagé presque toute l'année. Le Chili fait face à une augmentation de la demande en énergie et importe 70 % de l'énergie nécessaire à ses besoins. Aussi, le pays a placé le développement des énergies renouvelables au centre de ses priorités. De récentes évolutions de la législation relative au marché de l'énergie permettent de débloquent le potentiel du pays en matière d'énergie renouvelable distribuée, et de manière plus générale, de développement durable.

Le dynamisme de l'économie chilienne au cours des dernières années a entraîné le doublement de ses besoins en électricité. Le Chili est donc devenu le premier consommateur d'énergie d'Amérique latine, à 3568 kWh par habitant. Le pays reste en pleine croissance et la demande en électricité devrait passer de moins de 65 000 MWh en 2012 à plus de 100 000 MWh en 2020 (Stratégie énergétique nationale 2012-2030, ministère de l'Énergie du Chili). Pour répondre à cette augmentation attendue de la demande, le pays doit augmenter sa capacité de production de 8000 MW d'ici 2020. Cette nouvelle capacité servira directement l'économie du pays, dont 33 % de la production totale d'électricité sont consommés par l'industrie minière. En raison de l'augmentation de la demande en énergie, de la dépendance croissante aux énergies importées et des inquiétudes concernant l'environnement, le gouvernement juge aujourd'hui que la promotion de la diversification énergétique présente un intérêt stratégique. Pour mettre en place cette stratégie, il doit définir les sources d'énergie et les technologies prioritaires permettant d'assurer la sécurité énergétique et le développement durable du pays à un prix compétitif. Le solaire photovoltaïque se positionne ici comme une source d'énergie propre et compétitive, qui peut avoir un impact fort sur la diversification énergétique des pays disposant de ressources solaires importantes.

Au Chili, l'énergie provient principalement de centrales classiques, d'où elle est acheminée via deux systèmes principaux : le système interconnecté du nord (SING), qui représente 28 % de la capacité installée, et le système interconnecté central (SIC), qui représente 71 % de la capacité installée. Le marché de l'électricité chilien est organisé en pools, dont les coûts de production sont audités et le marché spot est réservé aux producteurs. Cet aspect le distingue des marchés basés sur la bourse sur lesquels les ventes et achats sont libres. À la différence des marchés internationaux, il n'existe pas au Chili de programme d'offre, seulement une communication des coûts de production. Le pool établit le tarif de l'électricité à court terme sur le marché (prix d'équilibre ou prix au comptant) par le biais d'un mécanisme régulé. Ce tarif est le résultat d'une opération économique centralisée réalisée par l'opérateur et peut différer dans chaque zone du système. Les clients consommant moins de 2 MW sont soumis à un tarif réglementé. Le calcul de

ce tarif inclut un bénéfice de 10 % pour les opérateurs. Les régulateurs chiliens autorisent la mise en place de contrats d'achat d'électricité entre les producteurs d'électricité et les clients consommant plus de 2 MW. Ces clients ne sont soumis à aucun tarif réglementé et peuvent négocier les prix et les conditions de leur contrat avec les producteurs ou les distributeurs. Ces clients représentent une part significative de la consommation totale d'énergie : environ 90 % dans le système interconnecté du nord (industrie minière) et 30 % dans le système interconnecté central

### Mise en œuvre réglementaire des énergies renouvelables non conventionnelles

Le long chemin vers la mise en œuvre technologique et l'ouverture du marché des énergies renouvelables au Chili a commencé en 2004, lors du vote de la loi n°19940 qui a défini pour la première fois sur le plan légal le concept de moyens de production d'énergie non conventionnels ( $P < 20$  MW), sans traiter spécifiquement de la technologie solaire photovoltaïque. La loi 20018 votée ensuite en 2005 contraint les distributeurs d'électricité à fournir 5 % d'énergie électrique par le biais de moyens de production d'énergie non conventionnels.

Le Chili n'a pas subventionné la mise en œuvre de technologies d'énergie renouvelable à l'échelle industrielle. Le pays a préféré établir un objectif obligatoire d'énergies renouvelables. Le 1er avril 2008, le gouvernement a voté la loi n° 20257 relative aux sources d'énergie renouvelables non conventionnelles. D'après cette loi, 10 % de la production électrique doivent être issus d'énergies renouvelables d'ici 2024 (5 % entre 2010 et 2014, +0,5 % chaque année à partir de 2015). En 2013, en se basant sur un besoin de production de 6500 GW pour la prochaine décennie, le gouvernement chilien a doublé ses objectifs d'énergies renouvelables les portant à 20 % pour 2025. Ce changement a été validé par une nouvelle loi approuvée par le Congrès, connue sous le nom de Loi 20/25. Cette loi a par ailleurs introduit un système d'enchères pour accorder des contrats d'électricité sur 10 ans, permettant de compléter tout quota non respecté. Les enchères se tiendront sous la supervision du Ministère de l'Énergie dans le respect de la neutralité technologique. Le non-respect de la loi entraîne une amende s'élevant à environ 28 \$ par MWh en dessous du quota.

Capacité solaire du Chili (MWp)				
Année (au mois de décembre)	Capacité exploitée	En construction	Avec approbation environnementale	En cours d'évaluation environnementale
2011	0	1	467	302
2012	3,6	1,3	3 107	804
2013	6,7	128	5 337	7814
2014 (novembre)	362	873	8 064	3 475

Tableau 1 : Capacité solaire du Chili. Source : CIFES, SEIA, CDEC-SIC, CDEC-SING, CNE

En cas de non-respect répété au cours des trois années suivantes, l'amende atteindra 42 \$/MWh. Il y a quelques mois, en octobre 2014, la loi Net Billing (loi N° 20.57 relative à la facturation nette) a été votée. Cette loi prévoit la reconnaissance de la production domestique (jusqu'à 100 KW) par les sociétés de distribution.

### **Capacité photovoltaïque du Chili**

Ces nouvelles politiques et mesures incitatives ont permis d'augmenter la part des technologies solaires photovoltaïques dans le mix énergétique du pays au cours des deux dernières années.

### **Politique de promotion des technologies photovoltaïques**

Au cours des dernières années, le gouvernement chilien a introduit, par le biais de différentes institutions, divers mécanismes d'incitation et de promotion des technologies photovoltaïques. Le CORFO est une agence gouvernementale qui dépend du ministère de l'Économie et qui a pour mission de faciliter l'accès des entreprises au financement pour l'innovation, l'entrepreneuriat et les transferts technologiques. Via le CORFO, le gouvernement a mis en place divers instruments de promotion des technologies photovoltaïques, y compris des prêts à taux plancher, des fonds à capitaux garantis ou à risque et des subventions pour l'innovation. Le CIFES, ex CER (Centro de Energías Renovables), est une autre institution clé qui facilite le développement des technologies photovoltaïques au Chili. La principale mission du CIFES consiste à coordonner les initiatives publiques et privées, à promouvoir les projets photovoltaïques et à diffuser des informations. Le CONICYT est une agence du ministère de l'Éducation chargée de promouvoir la création de capital humain et d'établir la base technologique et scientifique du pays. Il a pour objectif de renforcer les bases scientifiques et technologiques sur l'énergie solaire. Pour ce faire, il finance le Solar Energy Research Center (SERC-Chile), un pôle scientifique spécialisé, chargé de consolider les connaissances scientifiques et de promouvoir les programmes de transfert de technologie photovoltaïque.

En dépit des progrès, le faible nombre de projets photovoltaïques en cours d'exploitation aujourd'hui montre qu'il reste encore beaucoup d'obstacles politiques à franchir et que le pays n'a pas encore trouvé l'approche la plus adaptée pour garantir la diffusion de ces technologies.

### **Défis pour la planification de l'énergie solaire photovoltaïque au Chili**

Dans différents pays, l'accès à l'énergie dans les zones rurales isolées a été facilité par l'utilisation des technologies photovoltaïques. En effet, ces zones étant éloignées des systèmes électriques et faiblement peuplées, leur extension au réseau n'est en général pas économiquement viable et rarement rentable. C'est pourquoi des technologies solaires photovoltaïques hors réseau peuvent constituer une option durable et économique comparées aux solutions généralement utilisées dans ces zones.

Le Chili compte plus de 3500 communautés rurales isolées n'ayant pas accès aux réseaux électriques. Nombre d'entre elles n'ont par ailleurs pas accès au réseau routier et à une infrastructure permettant un approvisionnement régulier en énergies fossiles. Le déploiement des technologies solaires photovoltaïques peut donc constituer une solution économique et écologique et ainsi améliorer la qualité de vie de ces communautés.

Le pays a su tirer des enseignements des crises énergétiques successives et s'intéresse désormais davantage à la diversification énergétique, qu'il sait être la clé de la sécurité du système. Dans ce scénario, l'ajout de sources photovoltaïques au mix énergétique peut jouer un rôle clé dans la stratégie de diversification. Il peut notamment contribuer à réduire la dépendance à des sources d'énergies fossiles externes, en particulier dans le système interconnecté du nord, qui dessert principalement des entreprises minières et d'autres industries.

Les objectifs définis pour les technologies solaires photovoltaïques doivent également être réalistes et quantifiés et correspondre aux ressources et engagements alloués. Il est important de définir des objectifs en se basant sur des jalons et actions à court, moyen et long terme, et de mettre en place des mécanismes de suivi.

## Edition spéciale du journal des énergies renouvelables, 40<sup>e</sup> anniversaire du congrès « Le soleil au service de l'homme »

**Alain LIÉBARD**  
Président d'Observ'ER

En juin 1973 se tenait à l'Unesco le congrès « Le soleil au service de l'homme ». Fêté vingt ans plus tard dans le même palais par une autre manifestation "Le soleil au service de l'humanité" qui devait donner naissance au Processus du sommet solaire mondial, il est à nouveau honoré le 3 octobre 2013, pour son quarantième anniversaire, sous le titre « Les énergies renouvelables au service de l'humanité ».



[www.ademe.fr/soleil-service-lhomme-journal-energies-renouvelables-edition-speciale-3-octobre-2013](http://www.ademe.fr/soleil-service-lhomme-journal-energies-renouvelables-edition-speciale-3-octobre-2013)

Que s'est-il donc passé en juin 73 au cours de ces journées aussi chaudes que studieuses pour que cette manifestation soit perçue, aujourd'hui encore, comme un acte fondateur ?

**Yves-Bruno CIVEL,**  
Directeur Général d'Observ'ER

Les grands savants de l'époque se retrouvent à Paris pour partager leurs travaux et échanger sur leurs espoirs. Ce n'est certes pas la première fois qu'ils se réunissent. Mais ce jour-là, à travers les démonstrations technologiques tenues sur le parvis de l'Unesco, avec Reiser l'humoriste joyeux et grinçant du solaire décomplexé et dans les communications de haute volée présentées en amphi, leur message, de scientifiques, d'humanistes, de tiers-mondistes ou d'utopistes, passe. Leur puissante vision, relayée en octobre de la même année par la guerre du Kippour et son consécutif choc pétrolier donne, a posteriori, un formidable retentissement à leurs travaux. Les communications scientifiques prennent valeur de réponses à la crise et acquièrent subitement le statut d'alternatives. Dans cette curieuse conjonction astrale le solaire démarre en trombe !

En publiant ces quelques pages historiques, *Systèmes Solaires*, *Le Journal des Énergies Renouvelables* a souhaité contribuer, à la manière de la presse, aux manifestations du quarantième anniversaire. Nous avons choisi de présenter, sans pouvoir être exhaustifs, des grandes figures de l'époque, leurs textes et leurs réalisations sans lesquels les énergies vertes ne seraient pas devenues ce qu'elles sont. De 1973 à 2013 les technologies des renouvelables ont accompli un parcours remarquable. Championnes d'un environnement sans nuisances, on peut affirmer que la route leur est désormais grande ouverte. Un effort important reste sans nul doute à accomplir pour qu'elles se mettent authentiquement au service de l'humanité. Nées dans l'esprit de leurs concepteurs pour apporter l'énergie aux plus démunis, elles ont tout d'abord logiquement fleuri sur des terrains prospères mais il est temps désormais de leur rappeler aussi leur vocation initiale.

Puisse ce florilège, issu des trésors de notre bibliothèque, intéresser tous nos lecteurs, honorer les anciens et donner aux plus jeunes des racines pour exister.

### OUVERTURE

#### Joël Bertrand,

*Directeur général délégué à la science du CNRS*



Credit: photo© : CNRS

Joël Bertrand est ingénieur en génie chimique et maître es Sciences économiques. Il a obtenu les diplômes de docteur-ingénieur en 1977 à l'université Paul Sabatier de Toulouse, puis de docteur ès-sciences en génie chimique en 1983. Joël Bertrand a reçu la médaille de bronze du CNRS (Centre national de la recherche scientifique) en 1986. Il a été nommé Directeur du Laboratoire de génie chimique de Toulouse en 2001, puis a pris la direction du Réseau Thématique de Recherche Avancée (RTRA) « Sciences et Technologies pour l'Aéronautique et l'Espace » en 2007. De 1996 à 2005, il a également été coordinateur scientifique du programme de coopération postgraduée (PCP) France-Mexique en SPI et STIC (mission du ministère des Affaires étrangères). De 2004 à 2008, il a été président de la section Milieux fluides et réactifs : transports, transferts, procédés de transformation du Comité national de la recherche scientifique. Il a été nommé Vice-Président de la SFGP (Société française de génie des procédés) en 2007. Il a par ailleurs été nommé Directeur général délégué à la science du CNRS le 25 février 2010. Joël Bertrand assiste le Président du CNRS dans la définition de la stratégie scientifique de l'organisme. Il coordonne également les 10 instituts du CNRS et est chargé de l'interdisciplinarité et des partenariats.

#### Virginie Schwarz,

*Directrice générale déléguée de l'ADEME*



Credit: photo© : CNRS

Virginie Schwarz, ingénieur en chef des Mines, est la Directrice générale déléguée de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). Cette agence est un organisme public chargé de la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'énergie, du changement climatique, des déchets, de la réduction du bruit, de la qualité de l'air, des sites pollués et du développement durable. De 2009 à 2012, Virginie Schwarz a pris en charge la direction exécutive des programmes de l'ADEME, où elle a contribué au développement de connaissances et de solutions visant à réduire l'impact environnemental des activités humaines. Elle a également occupé le poste de Directrice Opérationnelle Déléguée Énergie, Air, Bruit de l'ADEME de 2003 à 2006. Experte en matière de politiques publiques dans le domaine de l'énergie et de l'environnement et plus particulièrement du changement climatique, elle a travaillé à New York de 2007 à 2009 pour le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD), dans le groupe environnement et énergie. Elle était la principale conseillère du directeur du Fonds pour l'environnement mondial sur la limitation du changement climatique. Parallèlement à ses activités de conseils en stratégie et évaluation de programmes, elle a participé à la conception et au lancement d'une initiative visant à élaborer des plans climat territoriaux au niveau régional dans les pays en développement. Avant de rejoindre l'ADEME en 2003, elle a dirigé pendant quatre ans la sous-direction de l'électricité à la Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières (DGEMP). Les responsabilités de cette entité couvrent la supervision du fournisseur d'électricité EDF et l'organisation du système électrique français : réglementation, tarifs, autorisations administratives pour les lignes électriques ou les centrales hydroélectriques. Auparavant, elle a occupé pendant 3 ans le poste de Chef de division adjoint à la division du développement industriel de la DRIRE Ile-de-France, en charge du pilotage des programmes d'aide au développement des PMI.

**Gretchen Kalonji,***Directrice générale adjointe pour les sciences naturelles de l'UNESCO*

Crédit photo: CNRS

Gretchen Kalonji a été nommée Directrice générale adjointe pour les sciences naturelles de l'UNESCO le 1er juillet 2010. Avant de rejoindre l'UNESCO en 2005, Gretchen Kalonji a occupé divers rôles de direction à l'Université de Californie. Elle a notamment été Directrice du développement de stratégies internationales auprès du Bureau du Président de l'université de Californie. Elle dirigeait la conception et la mise en œuvre de la première stratégie internationale des 10 campus de l'université de Californie. Elle a également occupé le poste de Directrice du développement de la recherche des systèmes. Avant de rejoindre l'université de Californie, elle s'est vu confier la chaire Kyocera en sciences des matériaux de l'université de Washington de 1990 à 2005. Quelques années plus tôt, elle a occupé le poste d'assistante et de professeur adjoint au département des sciences exactes et de l'ingénierie du MIT,

où elle a obtenu sa licence scientifique en 1980, puis son doctorat en 1982. Gretchen Kalonji est experte en contraintes de symétrie des structures et des propriétés des défauts cristallins, en changements de phase et en évolution microstructurale. Elle dispose également d'une grande expérience en science et formation à l'ingénierie, ainsi que dans les nouveaux modèles de recherche collaborative internationale. Ses travaux dans les sciences exactes et dans les innovations de la recherche et de la formation ont été récompensés à de nombreuses reprises. Elle est ou a été professeur invité dans un grand nombre d'universités et d'instituts à travers le monde, y compris l'Institut Max Planck (Stuttgart), l'Université de Paris, l'Université du Tohoku, les Universités du Sichuan et de Tsinghua et la nouvelle université de Peking à Shenzhen.

**INTRODUCTION : LES ÉNERGIES RENOUVELABLES DANS LE MONDE****Wolfgang Palz,***Président du Conseil mondial des énergies renouvelables*

De 1970 à 1976, Wolfgang Palz était chargé du développement des systèmes d'alimentation à l'agence française de l'espace (CNES) à Paris. En 1973, il a co-organisé le congrès de l'UNESCO, « Le soleil au service de l'homme » à Paris. De 1977 à 1997, il a géré le programme de développement des énergies renouvelables de la Commission européenne à Bruxelles. En 1997, Wolfgang Palz est devenu conseiller de la Commission européenne pour le déploiement des énergies renouvelables en Afrique et a également conseillé le Commissaire européen à l'énergie pour la rédaction d'un livre blanc sur les énergies renouvelables, publié en 1997. De 2000 à 2002, il a été membre d'un comité sur l'énergie du parlement allemand à Berlin et a travaillé à l'établissement d'une stratégie énergétique pour l'Allemagne à l'horizon 2050.

**Christine Lins,***Secrétaire exécutive de REN21 (Renewable Energy Global Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century)*

Christine Lins a été nommée Secrétaire exécutive de REN21 en juillet 2011. REN21 est un réseau international public-privé facilitant les échanges autour des énergies renouvelables et réunissant des organisations internationales, des gouvernements, des associations industrielles, des scientifiques, des universitaires, ainsi que des ONG œuvrant dans le domaine des énergies renouvelables. Le siège de REN21 est situé dans les locaux du PNUE à Paris, en France. Entre 2001 et 2011, elle a occupé le poste de Secrétaire général du Conseil européen de l'énergie renouvelable, la voix de l'industrie des énergies renouvelables en Europe. Elle dispose de plus de 17 ans d'expérience dans le domaine des sources d'énergie renouvelables. Elle a précédemment travaillé au sein d'une agence régionale de l'énergie en Autriche chargée de la promotion de l'efficacité énergétique et des sources d'énergie renouvelables. Elle est titulaire d'un master en économie internationale et en langues appliquées.

## Paolo Frankl,

*Responsable de la division Énergie, Agence internationale de l'énergie*



Paolo Frankl est Responsable de la division Énergie de l'Agence internationale de l'énergie, qu'il a rejointe en 2007. Il dirige les travaux de l'Agence en matière de conseils aux gouvernements dans les domaines des technologies, marchés et problèmes d'intégration aux systèmes liés aux énergies renouvelables. Il est membre de plusieurs comités consultatifs internationaux, y compris du conseil consultatif scientifique international de l'UE PVSEC et de Helmholtz, l'Association des centres de recherche allemands. Physicien de formation, le Dr Frankl est titulaire d'un doctorat en technologies de l'environnement et de l'énergie de l'université de Rome. Il a également effectué des recherches post-doctorat à l'INSEAD, à Fontainebleau en France. Le Dr Frankl dispose de plus de 20 ans d'expérience dans les systèmes et marchés des énergies renouvelables, l'évaluation des cycles de vie et l'éco-étiquetage. De 2000 à

2002, il était conseillé auprès du Directeur général du ministère italien de l'Environnement.

## Frank Wouters,

*Directeur général adjoint de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA)*



Credit photo © : Jean-José Wanegue

Frank Wouters a été nommé Directeur général adjoint de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) en septembre 2012. Il dispose de plus de 20 ans d'expérience dans le domaine des énergies renouvelables. Frank Wouters a précédemment occupé plusieurs postes de direction dans de grandes organisations et institutions œuvrant dans le domaine des énergies renouvelables et du développement durable, notamment Evelop International BV (Pays-Bas), Sol Holding AG (Allemagne), NICE International (Gambie) et l'université TDAU (Zambie). Avant de rejoindre l'IRENA, il a occupé le poste de Directeur de Masdar Power, développeur et opérateur de projets de production d'électricité renouvelable. Il y a géré des projets de plus de 3 milliards de dollars en Asie, en Afrique et en Europe. Tout au long de sa carrière, il a

travaillé avec diverses parties prenantes, y compris des membres du secteur privé et des agents gouvernementaux haut placés. Il a soutenu des politiques d'énergie durable dans de nombreux pays et a récemment joué un rôle clé dans l'élaboration de la politique d'énergie renouvelable d'Abou Dabi. Il est régulièrement invité à intervenir lors de conférences internationales et de réunions de haut niveau. Frank Wouters est titulaire d'un master en ingénierie mécanique de l'université technologie de Delft, aux Pays-Bas.

## SESSION I :

**Quels développements scientifiques et techniques des énergies renouvelables et quelles perspectives pour les filières industrielles aux horizons 2030 et 2050 ?**

## Daniel Lincot,

*Directeur de recherche au CNRS*



Credit photo © : Jean-José Wanegue

Daniel Lincot est diplômé de l'ESPCI ParisTech (École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la ville de Paris). Il a travaillé sur la synthèse de cellules photovoltaïques à base de tellure de cadmium durant sa thèse au Laboratoire de physique des solides du CNRS de Bellevue. Il est entré au Laboratoire d'électrochimie analytique et appliquée de l'École nationale supérieure de chimie de Paris et a mis au point la synthèse de couches minces de sulfure de cadmium et de diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) en milieu aqueux. EDF, le CNRS et Chimie Paristech lui ont confié la supervision de la création d'une filière de production par électrolyse de cellules solaires en couches minces à base de CIS. En 2008, il a présidé la Conférence européenne sur l'énergie solaire photovoltaïque (Valence, Espagne). Il dirige l'IRDEP (Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque) créé par EDF,

le CNRS et Chimie ParisTech depuis 2009. Depuis 2010, il dirige également la fédération de recherche sur le photovoltaïque du CNRS en Île-de-France. Daniel Lincot a été lauréat de la Médaille d'argent du CNRS en 2004. Il a reçu en 2011 la médaille Charles Eichner de la Société Française de Métallurgie et de Matériaux (SF2M).

**Richard Swanson,**  
Fondateur de Sunpower (États-Unis)



Richard Swanson a obtenu une licence en sciences (génie électrique) et un Master en sciences et ingénierie électrique à l'université de l'État de l'Ohio en 1969 et un doctorat en génie électrique à l'université de Stanford en 1975. Il a ensuite rejoint la faculté de génie électrique de Stanford. Ses recherches portaient sur les propriétés semi-conductrices du silicium et visaient à mieux comprendre le fonctionnement des cellules solaires en silicium. Ces études ont fortement contribué à l'amélioration des performances des cellules solaires en silicium. En 1991, le Dr Swanson a démissionné pour se consacrer à plein temps à SunPower Corporation, une entreprise qu'il a créée pour développer et commercialiser des systèmes photovoltaïques économiques. SunPower produit les panneaux photovoltaïques les plus performants du marché et est cotée au NASDAQ sous le code SPWR. Richard Swanson a quitté SunPower en 2012.

Ses travaux ont été unanimement reconnus. Il a reçu le prix William R. Cherry de l'IEEE pour ses contributions au domaine photovoltaïque en 2002 et le prix Becquerel de la Commission européenne en 2006. Il a été élu membre de l'IEEE en 2008 et de la National Academy of Engineering en 2009. En 2009, il a reçu le prix Energy Innovator de l'Economist Magazine. Il a obtenu la médaille Jin-ichi Nishizawa de l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) en 2010 pour la conception et la commercialisation d'une technologie de cellule solaire à contact par points haut rendement et la médaille du mérite de Karl Boer Solar Energy en 2011.

**Dr. Ayodhya Tiwari,**  
« École polytechnique fédérale de Zurich » (Suisse)



Crédit photo: CNRS

Ayodhya N. Tiwari est à la tête du Laboratoire des couches minces et photovoltaïque de l'Empa (Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche) et professeur titulaire de l'École polytechnique fédérale de Zurich en Suisse. Il est Président et co-fondateur de Flisom AG. Cette entreprise a développé des équipements et des processus de fabrication permettant la production à bas coût de modules solaires monolithiques souples selon un procédé de déposition sur rouleaux. Il dispose de plus de 30 ans d'expérience en recherche et développement dans diverses technologies photovoltaïques. Il a co-écrit plus de 200 articles de recherche et participé à plus de 240 conférences. Il a co-présidé et co-organisé plusieurs conférences internationales, co-édité des numéros spéciaux de revues de premier plan sur les cellules solaires et les couches minces et est membre des comités éditoriaux de plusieurs revues. Il a été

conseillé auprès de diverses institutions et membre de la délégation des experts en photovoltaïque de l'Union européenne et d'autres agences nationales. Dr Tiwari a été colauréat de plusieurs récompenses, ses 9 étudiants ont gagné le prix des jeunes scientifiques et d'autres récompenses (13 au total) dans des conférences internationales sur le thème de la recherche innovante. Les principales contributions du groupe de Tiwari couvrent les domaines suivants : développement de cellules solaires flexibles à très haut rendement (rendement de 20,4 % pour la technologie CIGS et de 13,8 % pour la technologie CdTe avec des processus adaptés à la déposition sur rouleaux), mini-modules solaires flexibles interconnectés monolithiques présentant un rendement de 16 %, technologie CIGS présentant un rendement supérieur à 19 % et technologie CdTe présentant un rendement supérieur à 15,5 % sur verre avec des processus adaptés à la production en ligne, processus de déposition simple et sûr hors vide pour les cellules solaires CIGS et kèsterite.

**Prof. Dr. Masafumi Yamaguchi,**  
« Toyota Technology Institute » (Japon)



Masafumi Yamaguchi a obtenu son doctorat à l'université de Hokkaido en 1978. Il est Directeur de la division Solar Cells, Materials, Solar Cells and Modules de l'International Solar Energy Society (ISES). Dr Yamaguchi supervise le projet Creative Clean Energy Generation using Solar Energy de la Japan Science and Technology Agency (JST) et dirige le projet de recherche et développement Next Generation High Performance Photovoltaics de la New Energy and Industrial Technology Development Organization of Japan (NEDO). Il est le principal acteur du projet de recherche et de développement conjoint entre l'Union européenne et le Japon sur les systèmes photovoltaïques à concentration, qui vise à mettre au point les cellules solaires, modules et systèmes à concentration présentant le rendement le plus élevé au monde. Il a été récompensé à plusieurs reprises, notamment par le prix Becquerel de la Commission européenne en 2004 et le prix William Cherry de l'IEEE en

2008 pour ses contributions exceptionnelles au développement de la science et des technologies photovoltaïques (cellules solaires multi-jonction haut rendement, cellules solaires spatiales, cellules solaires à concentration), ses qualités de leader mondial du développement du photovoltaïque et son rôle majeur dans le renforcement de la coopération internationale.

**Gilles Flamant,**  
Directeur du laboratoire PROMES, CNRS (France)



Gilles Flamant est Directeur du Laboratoire PROCédés, Matériaux et Énergie Solaire (PROMES) du CNRS basé à Odeillo (four solaire de 1 MW) et à Perpignan, dans le sud de la France. PROMES compte environ 90 employés à temps plein pour un total d'environ 160 personnes. Gilles Flamant a obtenu un diplôme d'ingénieur en chimie (Paris) et un doctorat en génie des procédés (Toulouse). Il travaille dans le domaine de l'énergie solaire concentrée et des procédés à haute température depuis environ 35 ans. Il a co-écrit plus de 200 articles dans des revues scientifiques internationales et supervisé 35 thèses de doctorat. Il est actuellement éditeur de la revue Journal of Solar Energy Engineering de l'ASME ; il participe à trois projets européens liés aux technologies solaires à concentration et coordonne l'un d'entre eux.

**Preben Maegaard,**  
Directeur du Folkecenter for Renewable Energy (Danemark)



Preben Maegaard, né en 1935, est un pionnier danois des énergies renouvelables. Depuis 1974, il intervient dans les domaines organisationnel, politique et technologique au niveau local, national et international pour encourager la transition des énergies fossiles vers les énergies renouvelables. De 1984 à 2013, il a occupé le poste de Directeur du Nordic Folkecenter for Renewable Energy, un institut œuvrant pour le développement et l'utilisation des énergies renouvelables. De 1981 à 2001, il a participé à plusieurs comités et conseils gouvernementaux danois pour le développement et l'utilisation des énergies renouvelables. En 1996, il est devenu membre du conseil d'EUROSUN, un projet pluridisciplinaire mis sur pied par le Parlement européen. De 1999 à 2002, il a été le conseiller aux énergies renouvelables du président du Mali, Alpha Konaré, et a permis la création du Mali Folkecenter. Depuis plus de 30 ans, Preben Maegaard

dirige, organise et participe à de nombreux séminaires, ateliers et conférences nationaux et internationaux. Il a également présidé les conférences World Wind Energy et rédigé ou co-rédigé de nombreux rapports, livres et articles en danois, anglais, allemand et japonais sur le thème des énergies renouvelables et du développement durable. Il a présidé de 1979 à 1984 l'association danoise pour les énergies renouvelables (OVE). Il a été nommé Vice-Président d'EUROSOLAR, l'association européenne pour la généralisation des énergies renouvelables en 1991, puis Directeur général adjoint en 2006. Il a occupé le poste de Président-Fondateur de la World Wind Energy Association (WWEA) de 2001 à 2005. En 2001, il a été nommé Président du comité du Conseil mondial des énergies renouvelables (WCRE). Depuis 1999, il est membre du conseil de la Fédération Européenne des Énergies Renouvelables (EREF). En mars 2010, Preben Maegaard a participé au documentaire cinématographique « The 4th Revolution ».

**Georges Kariniotakis,**  
Centre PERSEE, Mines ParisTech (France)



Georges KARINIOTAKIS est né à Athènes, en Grèce. Il a obtenu son diplôme en ingénierie et son master en science en Grèce respectivement en 1990 et 1992, puis son doctorat de l'École des Mines de Paris en 1996. Il est actuellement scientifique en chef du Centre Procédés, Énergies Renouvelables et Systèmes Énergétiques de MINES ParisTech et dirige le groupe Énergies renouvelables et systèmes électriques intelligents. Il a coordonné ou participé à plus de 40 projets de recherche et de développement dans le secteur de l'intégration des énergies renouvelables, de la génération distribuée et des systèmes électriques intelligents. Il a coordonné trois grands projets européens sur la période 2002-2012 dans le domaine de la prévision de l'énergie éolienne (Anemos, Anemos.plus et SafeWind). Ses intérêts scientifiques incluent notamment la modélisation, la gestion et la planification des systèmes électriques, la prévision de séries chronologiques et la prise de décisions en situation d'incertitude. Il a rédigé plus de 140 articles scientifiques dans des revues et participé à de nombreuses conférences. Il est Président du groupe d'experts sur l'intégration du réseau et membre du comité d'orientation de la plateforme technologique européenne pour l'énergie éolienne (TPWind), ainsi que d'autres groupes d'experts des domaines de l'énergie éolienne et des systèmes électriques intelligents. Il est membre « Senior » de l'IEEE.



Crédit photo: CNRS

**Alain Dollet,**  
*Directeur adjoint scientifique au CNRS, animateur de la cellule Énergie.*

Diplômé de l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs en Génie Chimique de Toulouse (ENSIGC) en 1988, il a obtenu son doctorat dans le domaine des process plasmas en 1993 à l'université de Toulouse. Il a rejoint le CNRS en 1994 et a commencé sa carrière au laboratoire PROMES (PROcédés, Matériaux et Énergie Solaire) d'Odeillo. Ses premières recherches étaient axées sur les dépôts chimiques en phase vapeur. En 2005, il a démarré de nouvelles recherches sur la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire concentrée. Il a été Directeur adjoint du laboratoire PROMES de 2004 à 2010. Parallèlement à ses recherches au laboratoire PROMES, il est actuellement chargé de la cellule Énergie du CNRS et Directeur scientifique adjoint de l'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes, l'un des 10 instituts du CNRS. Il est également membre du comité consultatif de la Conférence Internationale sur la conversion photovoltaïque (CPV-x) et coordinateur d'une série sur l'énergie pour les éditions ISTE-Wiley.

**Claude Roy,**  
*Président du club de bio-économie et membre du Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER)*



Crédit photo: CNRS

Claude ROY est membre du Conseil Général de l'Alimentation, de l'Agriculture et des Espaces Ruraux après avoir été Coordonnateur Interministériel pour la Valorisation de la Biomasse (2005-2008). Il contribue, auprès du Gouvernement et des professions concernées, à faciliter le développement des filières de la forêt-bois-fibres et de l'agro-industrie pour la production de carburants, de combustibles, de matériaux et de bases chimiques renouvelables d'origines agricole et forestière. Il intervient à ce titre dans le cadre des politiques énergétique, agricole, forestière, des déchets, de la recherche et de lutte contre le changement climatique, en métropole comme outre mer. Ingénieur Agronome, il a été notamment Directeur puis Directeur Exécutif de l'ADEME (1998-2004), responsable du consulting d'un groupe international d'ingénierie industrielle (1991-1997) et conseiller technique du Ministre de l'Agriculture (1986-1988), après avoir assuré, dans ce Ministère, la gestion des programmes d'équipements du Fonds Forestier National (2000-2005), puis celle des instruments de développement rural du FIDAR au sein de la DATAR (1989-1990). Il est notamment président et fondateur du CLUB des Bio-économistes.

## **Caroline Rayol,**

*Responsable Projets Biocarburants Avancés et Ressources, Pôle de compétitivité Industries et Agro-Ressources*



Caroline Rayol travaille depuis 2009 dans le secteur des biocarburants au Brésil et en France. Graduada en droit au Brésil et titulaire d'un MBA de Commerce International en France, elle a débuté sa carrière à l'ADEME comme chargée d'études biocarburants. En tant que responsable pour des études socioéconomiques sur la filière canne à sucre brésilienne à la Confédération des Planteurs de Betteraves (CGB), elle a pu approfondir sa connaissance de la chaîne de valeur de l'éthanol et de l'influence du sucre sur ce marché. En qualité de Conseillère « bioénergies » du premier Ministre brésilien, Caroline Rayol a acquis une excellente expertise dans le domaine des politiques publiques des biocarburants durables. Elle est actuellement Responsable Projet « Bioénergies et Ressources » au Pôle de Compétitivité Industrie et Agro-Ressources (IAR) ; elle est passionnée par l'étude des avantages comparatifs des bioénergies.

## **Jean Luc Duplan,**

*Expert Biomasse IFP Énergies Nouvelles (IFPEN)*



(DG Recherche de l'UE). Il co-préside le groupe de travail sur les énergies décarbonées du pôle de compétitivité français AXELERA.

Jean-Luc Duplan est diplômé de l'école d'ingénieurs en génie chimique de Lyon, et a obtenu son doctorat à l'Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon, en France. Il a rejoint l'IFPEN en tant qu'ingénieur de recherches dans le raffinage et la pétrochimie. Il a été nommé Directeur du projet FCC en 2002, puis du projet Biomasse en 2004. En 2009, il est devenu Directeur adjoint de la division Technologies de développement durable. Depuis 2011, il est membre de la direction de l'IFPEN-Lyon en tant que Conseiller sur les technologies propres et expert en biomasse. Il a rédigé plus de 60 publications et communications, est l'auteur de 20 brevets et a écrit 4 chapitres d'ouvrages. Il est co-animateur du groupe programmatique sur les bioénergies de l'ANCRE (Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie) et expert pour l'initiative industrielle européenne sur les bioénergies



## **Marc Boeuf,**

*Directeur R&D, France Énergies Marines*

Après des études universitaires en géophysique marine, puis un début de carrière dans une entreprise de conseils en ingénierie, Marc BOEUF a rejoint DCNS, une entreprise de construction navale, au milieu des années 2000. Au cours de cette période, il a participé au développement des énergies marines renouvelables en France. Il est désormais Directeur R&D de l'institut France Énergies Marines, un établissement qui se consacre aux énergies marines renouvelables.

## **Burkard Sanner,**

*Président du European Geothermal Energy Council*



co-écrit de nombreuses publications, et donne régulièrement des cours de géothermie lors d'universités d'été.

Il représente le secteur de l'énergie géothermique auprès de l'administration européenne à Bruxelles, en Belgique, en tant que Président du European Geothermal Energy Council (EGEC). Il travaille dans le secteur de l'énergie géothermique depuis 1985, principalement en recherche et développement avec l'université Justus-Liebig de Giessen, en Allemagne. Il a participé à des projets de l'IEA sur les pompes à chaleur géothermiques et le stockage géologique de l'énergie thermique de 1986 à 2004, et à des projets européens liés à l'énergie géothermique depuis. Il travaille actuellement dans la recherche et le développement, ainsi que dans la conception de systèmes à énergie géothermique avec UBeGGbR, Wetzlar, Allemagne, depuis 2004. Il a écrit et



Crédit photo: CNRS

**Jean-Jacques Graff,**  
*Président d'Électricité de Strasbourg Géothermie (ESG)*

Jean-Jacques Graff est ingénieur diplômé de l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers. Après de longues années d'expérience dans les réseaux de distribution d'électricité au sein d'Électricité de Strasbourg, une filiale d'EDF en Alsace, il a pris en 2003 la tête de Sultz, un projet européen sur la géothermie profonde. En 2008, il a lancé ES-Géothermie (ESG), une filiale dédiée au développement d'un projet de géothermie profonde. Il en est désormais Directeur général. Il est également Vice-Président de l'Association Française des Professionnels de la Géothermie depuis sa création en 2010. Il y est chargé de la filière Haute énergie.

**Anne Varet,**  
*Directrice Recherche et Prospective de l'ADEME*



Le 10 janvier 2011, Anne Varet a rejoint l'ADEME au poste de Directrice de la recherche et de la prospective. Membre du comité de direction, elle est chargée de la coordination de la stratégie et des programmes de recherche, de la gestion des recherches sur les technologies avancées (H<sub>2</sub> et CCS) et de l'unité responsable des études économiques, sociales et de prévisions. Depuis 2007, Anne VARET occupait le rôle de Directrice de la recherche et de l'innovation à l'institut FCBA (Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement), un centre de technologie industriel de 350 employés. Membre du comité de direction et du comité stratégique, elle était chargée de définir la stratégie de recherche et d'innovation en lien avec le secteur industriel, la gestion de projets de recherche et le développement de partenariats de recherche. Elle a mis en place des projets, y compris des programmes européens et nationaux, et a facilité les relations avec les pôles de compétitivité. De 2006 à 2007, elle a été Directrice de la recherche pour l'AFOCEL et coordinatrice scientifique dans cette même organisation de 2002 à 2005 pour des études et recherches dans le domaine de la forêt, du bois et du papier. Elle est titulaire d'un doctorat en physiopathologie moléculaire végétale et d'un diplôme d'ingénierie de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon. Elle a été auditrice de l'Institut des Hautes Études pour la Science et la Technologie (IHEST) en 2009-2010.

**SESSION II :**  
**Comment lever les verrous au déploiement des énergies renouvelables ?**

**Chair, Rémi Chabrilat,**  
*Directeur Productions et Énergies Durables de l'ADEME*



Diplômé en 1980 de l'École des Mines d'Alès, il y a inauguré l'option « environnement », une des premières créées par une école d'ingénieurs en France. Il débute sa carrière en 1981 à la DRIRE Bourgogne, puis à l'ANRED (Agence Nationale pour la Récupération et l'Élimination des Déchets) ; il sera pendant une dizaine d'années un spécialiste des déchets industriels et des sites pollués. A la création de l'ADEME en 1992, il est coordinateur Entreprises à la Délégation Régionale Rhône-Alpes. Il devient directeur régional Auvergne en 1997 ; il y développera notamment des programmes de promotion des énergies renouvelables mobilisant les principaux acteurs publics. Il rejoint au début de l'année 2011 le siège de l'ADEME pour y prendre la responsabilité de la Direction Production et Énergies Durables qui regroupe les services centraux chargés de la biomasse, des énergies renouvelables et des réseaux, des entreprises et des écotechnologies, de l'agriculture et de la forêt.



### **Nouredine Hadjsaid,**

*Professeur à l'INP Grenoble, laboratoire G2Elab (CNRS)*

Dr Nouredine Hadjsaid a obtenu son doctorat et son Habilitation à Diriger des Recherches à l'Institut National Polytechnique de Grenoble respectivement en 1992 et 1998. Il est actuellement professeur à temps complet à l'INP/ENSE3 de Grenoble, où il dirige des recherches au G2ELAB. Il est également professeur invité à la Virginia Polytechnic Institute & State University (Virginia Tech - États-Unis). Ses recherches se concentrent principalement sur les réseaux intelligents. Il a dirigé le centre de recherche commun entre EDF, Schneider Electric et l'INP Grenoble (IDEA : Inventer la Distribution Électrique de l'Avenir) sur les réseaux intelligents de 2001 à 2013. Il est actuellement responsable de la chaire d'excellence d'ERDF sur les réseaux intelligents. Dr Hadjsaid a publié plus de 200 articles scientifiques dans des revues et actes de conférences internationales et a écrit/co-écrit et supervisé plus de 7 ouvrages traitant de l'énergie et des réseaux intelligents.



Crédit photo: CNRS

### **Jean-Marie Tarascon,**

*Professeur à l'université de Picardie, Directeur de RS2E, membre de l'Académie française des sciences*

Jean-Marie Tarascon (1953) est Professeur au Collège de France, où il est titulaire de la chaire Chimie du solide et de l'énergie. Cependant, l'essentiel de sa carrière s'est déroulé aux États-Unis, où il a développé la batterie plastique à ions lithium en 1994. De retour en France en 1995, il a créé le réseau européen d'excellence ALISTORE-ERI qu'il a présidé jusqu'en 2010, date à laquelle il est devenu directeur du LABEX STORE-EX et a pris la tête du nouveau réseau français sur le stockage électrochimique de l'énergie, RS2E. Ses recherches actuelles sont axées sur les matériaux de batterie. Il a rédigé plus de 560 articles et détient 73 brevets.



Crédit photo: CNRS

### **Thierry Priem,**

*Directeur de programme au Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Énergies Nouvelles et les nanomatériaux, CEA/LITEN (France)*

Thierry PRIEM, Directeur du programme Piles à Combustible du CEA, a obtenu un diplôme d'ingénieur de l'École Polytechnique et de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris. Il est également titulaire d'un doctorat en Physique du Solide. Il dispose d'une large expérience technique et scientifique au CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) dans différents domaines de recherche : science des matériaux, énergies nouvelles, etc. Pendant 4 ans, Thierry Priem a dirigé un service de 60 personnes travaillant sur les énergies nouvelles (hydrogène et piles à combustible, énergie photovoltaïque, etc.). Il possède également une expérience dans le domaine des transferts technologiques et des négociations avec des partenaires industriels. Depuis mi-2007, il dirige le programme Piles à Combustible et hydrogène du CEA à Grenoble, dans le sud-est de la France.

### **Olivier Vidal,**

*Directeur de recherche du CNRS, coordinateur du programme européen ERA-MIN*



Olivier Vidal est Directeur de recherche au CNRS, à l'Institut des Sciences de la Terre de Grenoble. Son doctorat de minéralogie expérimentale en poche (université de la Ruhr en Allemagne et ENS Paris), il a travaillé au CEA et au SWRI (Texas) et s'est spécialisé dans la modélisation des réactions minéralogiques, qui trouvent des applications dans la géodynamique terrestre, le stockage des déchets radioactifs ou du CO<sub>2</sub> et la production d'hydrogène naturel. Il est actuellement coordinateur scientifique du réseau européen ERA-MIN pour la gestion industrielle des matières premières non énergétiques.

**Franz Alt,***Journaliste, spécialiste des énergies renouvelables*

Crédit photo© : CNRS

Dr Franz Alt a étudié les sciences politiques, l'histoire, la théologie et la philosophie et a publié sa thèse de doctorat sur Konrad Adenauer. De 1968 à 2003, il a travaillé pour la chaîne de télévision publique ARD, où il était responsable et présentateur des programmes politiques. Depuis 1992, il produit et présente des sujets liés au développement durable, comme la transition vers l'énergie solaire, l'exploitation agricole biologique, les constructions durable, l'économie durable et les économies d'énergie. Aujourd'hui, Dr Franz Alt rédige des commentaires et des rapports de situation pour plus de 40 journaux et magazines. En 2011, il a été désigné Présentateur de l'année en Allemagne et a fait son entrée dans le « Hall of Fame ». Il est le présentateur de télévision allemand qui a reçu le plus de récompenses : Goldene Kamera, Adolf-Grimme-Preis, German Solar Prize, European Solar Prize, Environmental Award of the German economy, Innovation Award 2006, Human Rights Award et Democracy Award. En récompense de ses contributions exceptionnelles, il a reçu en 2011 le prix « 5 Sterne Redner Award ».

**Jean-Louis Bal,***Président du Syndicat des Énergies Renouvelables (SER)*

Crédit photo© : CNRS

Ingénieur électricien de l'Université de Louvain (Belgique), Jean-Louis BAL a co-fondé la Société IDE (Belgique) et en a été Directeur commercial (1975-1985). Recruté par les Grands Moulins de Paris, il fut Directeur Commercial Régional à la Société CHRONAR France (devenue NAPS-France) de 1985 à 1992. Jean-Louis BAL poursuit sa carrière à l'ADEME en tant que Chef du programme prioritaire Energies Renouvelables (EnR), puis Directeur Adjoint du Bâtiment et des Energies Renouvelables de 1993 à 2003. Directeur des Energies Renouvelables, des Réseaux et des Marchés Energétiques, puis Directeur Productions et Energies Durables de 2004 à 2010. Il est Président du Syndicat des Energies Renouvelables depuis mars 2011.

**SESSION III :****comment favoriser les conditions du déploiement futur des énergies renouvelables pour un accès universel à l'énergie ?****Dominique Campana,***Directrice de l'Action internationale de l'ADEME*

Dr Dominique Campana est directrice de l'Action internationale de l'ADEME, Agence de l'Environnement et de Maîtrise de l'Energie, depuis 1997. Elle a travaillé pendant plus de 30 ans dans les domaines de l'efficacité énergétique, des énergies renouvelables et de l'environnement, en commençant sa carrière en tant qu'ingénieur de recherche à l'École des Mines de Paris, puis en rejoignant l'ADEME en 1992. Elle a participé à de nombreux programmes de coopération bilatéraux et multilatéraux ayant trait aux questions énergétiques et environnementales, et a une connaissance affirmée des acteurs internationaux publics et privés. Elle a joué un rôle de premier plan dans les négociations internationales sur le changement climatique et le développement durable, y compris lors du Sommet de la Terre (Rio+20). Elle a contribué à des initiatives de soutien au développement à l'international des éco-innovations françaises, avec

la création en 1997 du Club ADEME International. Ce réseau réunit plus de 130 éco-entreprises françaises innovantes actives sur le marché mondial du développement durable. Dominique Campana est titulaire d'un doctorat en sciences physiques de l'Université de Lyon I sur les applications de l'énergie photovoltaïque (1978). Dominique Campana a été honorée en 2006 comme Chevalier « de l'Ordre National du Mérite ».

## Zitouni Ould-Dada,

*Directeur de l'Unité Technologie, Branche énergie du PNUE*



Crédit photo: CNRS

Dr Zitouni Ould-Dada est actuellement directeur de l'Unité Technologie de la division Technologie, Industrie et Économie (DTIE) du PNUE. Il supervise des programmes liés au déploiement de technologies économes en énergie et sobres en carbone dans les pays en développement. Il coordonne également les actions du PNUE liées au Centre et Réseau des Technologies du Climat (CTCN) au titre de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Dr. Ould-Dada est mondialement reconnu pour sa diplomatie et son leadership efficace. Il obtient des résultats et parvient à dénouer des situations complexes. Son expérience couvre de nombreux domaines, du changement climatique aux technologies sobres en carbone, en passant par la sécurité énergétique et la radioprotection. Depuis 1997, il travaille pour le gouvernement britannique à divers postes de premier plan au ministère de

l'Énergie et du Changement climatique, au ministère de l'Environnement, aux affaires alimentaires et rurales, à l'Agence de normes alimentaires et à l'Agence de l'environnement. Il a également assumé diverses responsabilités internationales, notamment : Négociateur en chef du Royaume-Uni et agent de négociation pour le changement climatique dans le cadre de la CCNUCC, Président du comité des politiques et stratégies de l'IRENA et membre du groupe de travail les technologies d'énergies renouvelables (REWP) de l'AIE.

## Houda Allal,

*Directrice générale de l'Observatoire Méditerranéen de l'Énergie*



Crédit photo: CNRS

En 1992, Dr Houda Allal a rejoint l'OME, dont elle assure actuellement la direction générale. Elle est experte en prospection énergétique, énergies renouvelables, efficacité énergétique et développement durable dans la région méditerranéenne. Elle a occupé plusieurs postes au sein de l'OME. Elle a notamment été Directrice des énergies renouvelables et du développement durable, ainsi que Directrice de stratégie. Elle a coordonné plusieurs grands projets régionaux liés aux énergies renouvelables dans la région méditerranéenne et publié plusieurs articles. Elle est diplômée en économie de l'énergie de l'Institut Français du Pétrole, Université Panthéon-Assas et de l'université de Dijon (France). Elle est également titulaire d'un doctorat de l'École des Mines de Paris.

## Mahama Kappiah,

*Directeur exécutif du Centre Régional pour les Energies Renouvelables et l'Efficacité Énergétique*



Crédit photo: CNRS

Mahama Kappiah est Directeur exécutif du centre pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique (ECREEE) de la CEDEAO. Il a participé activement à la création du centre, dont l'objectif est d'assurer un accès accru à une énergie fiable, abordable et propre dans l'Ouest de l'Afrique. Sous son impulsion, l'ECREEE est devenu une agence de renommée mondiale pour la promotion des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique en Afrique subsaharienne et d'autres communautés économiques régionales telles que l'EAC et la SADC qui souhaitent suivre la même voie. Avant la création de l'ECREEE en 2010, Mahama Kappiah dirigeait la division Énergie de la CEDEAO. Il a notamment créé le Système d'Échanges d'Énergie Électrique Ouest Africain (EEEOA) et l'Autorité de Régulation Régionale du Secteur de l'Électricité de la CEDEAO (ARREC). Avant de rejoindre la commission de la CEDEAO, il a occupé

divers postes au service de planification et de développement de la Volta River Authority du Ghana. Mahama Kappiah est membre du comité REN21. Il est titulaire d'un master en génie des sciences électromécaniques de l'institut polytechnique de Kharkov, en Ukraine. Il dispose de plus de 20 ans d'expérience dans les domaines de l'énergie, de l'environnement, du changement climatique et du développement durable en Afrique de l'ouest et au-delà.

**Michael Eckhart,***Directeur général, Citigroup (États-Unis)*

Michael Eckhart est Directeur général et Directeur du service finance environnementale à New York. Il a précédemment été Président fondateur de l'American Council on Renewable Energy, une ONG basée à Washington DC, où il est devenu leader national et international dans le secteur des énergies renouvelables. Auparavant, il a développé le financement des énergies solaires dans le cadre de l'initiative SolarBank en Europe, Afrique du Sud et Inde. Il a également été PDG de United Power Systems, Vice-Président d'Areté Ventures, Planificateur stratégique de General Electric et Expert en énergie de Booz, Allen & Hamilton. Il a reçu de nombreuses récompenses et distinctions. Il a notamment été élu Renewable Energy Man of the Year en Inde en 1998 et a reçu le Skoll Award for Social Entrepreneurship en 2008. Il a été sous-mariner pour l'US Navy et a obtenu un diplôme en génie électrique de l'université de Purdue, ainsi qu'un MBA de la Harvard Business School.

**Christian de Gromard,***Chef de projet Énergie pour l'Agence Française de Développement (AFD)*

Après une première expérience professionnelle dans l'appareillage électrique, C. de Gromard s'est spécialisé sur les énergies renouvelables en 1979 à l'Indian Institute of Science (Bangalore), avant de rejoindre en 1981 le Département international de l'Agence Française de Maîtrise de l'Énergie (AFME), comme responsable Afrique. En 1987, il crée un bureau de consultants spécialisé sur l'électrification rurale dans les pays en développement. Entré en 1992 à l'AFD, il a été responsable du pôle « Climat » au Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM). A partir de 2002, au sein du département en charge de l'Énergie à l'AFD, il exerce la fonction de Chef de Projet dans différentes zones géographiques (Chine, Inde, Maghreb, Afrique de l'Ouest, Afrique australe, etc.). Il a coordonné la formulation de la stratégie Énergie adoptée par l'AFD pour la période 2012-2016.

**SESSION IV : Synthèse et propositions****Osman Benchikh,***Responsable du programme pour les énergies renouvelables, UNESCO*

Dr Osman Benchikh est membre du groupe énergie des Nations Unies et y représente l'UNESCO. Il est l'auteur de plusieurs publications sur les énergies renouvelables et a lancé plusieurs initiatives autour de l'utilisation et l'application de sources d'énergie renouvelables dans le but de garantir un accès à l'énergie durable pour tous et des objectifs de développement durable. En promouvant une large utilisation des sources d'énergie renouvelables à l'échelle internationale, il a contribué à la conception et à la mise en œuvre du programme World Solar, dont il a été membre du secrétariat de coordination. Dr Benchikh a lancé le cadre conceptuel de renforcement des capacités et des connaissances connu sous le nom de Programme mondial d'éducation et de formation en matière d'énergie renouvelable et a publié divers documents de formation.

Ses activités à l'international l'ont amené à présider et/ou participer à plusieurs organismes internationaux de promotion des sources d'énergie renouvelables.

## François Moisan,

*Directeur exécutif Stratégie, Recherche et International, ADEME*



François Moisan est Directeur Exécutif Stratégie Recherche International et Directeur scientifique de l'ADEME, organisme public chargé de la mise en œuvre des politiques publiques françaises dans les domaines de l'efficacité énergétique, des énergies renouvelables et de l'environnement. Il travaille dans le secteur des politiques d'efficacité énergétique depuis plus de 30 ans. Il est Président du comité efficacité énergétique du Conseil mondial de l'énergie depuis 1998 et Président du comité exécutif du Partenariat international pour la coopération en matière d'efficacité énergétique (IPEEC). Il a présidé le groupe de travail sur l'efficacité énergétique de l'Agence internationale de l'énergie de 2001 à 2005 et a été élu président de l'European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE) (2002-2006). François Moisan est ingénieur électricien (École Supérieure d'Électricité de Paris, 1972) et docteur en sciences économiques (Université de Grenoble, 1983). Il a participé à plusieurs partenariats avec des institutions japonaises. Il est chargé au nom de l'ADEME de la coopération avec la NEDO depuis 1995. Il a été chargé de la coopération entre l'ADEME et l'AIST de 1985 à 2005. Il est également membre du Comité Consultatif Conjoint Franco-Japonais pour la Science et la Technologie (CCCFJ) présidé depuis 2005 par M. Hiroyuki YOSHIKAWA (AIST) et M. F. GROS (Académie française des sciences).

## Jean-Yves Marzin,

*Directeur de l'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes du CNRS*



Ancien étudiant de l'École Polytechnique et ingénieur diplômé de l'École Nationale Supérieure des Télécommunications, Jean-Yves Marzin est titulaire d'un doctorat en physique. Il est ingénieur en recherche spécialisé dans les semi-conducteurs au Centre National d'Études des Télécommunications. Jean-Yves Marzin a rejoint le CNRS en 1996 au poste de Directeur du Laboratoire de microstructures et de micro-électronique. En 2001, il a contribué à la création du Laboratoire de photonique et de nanostructures, qu'il a dirigé jusqu'en 2011. En février 2013, Jean-Yves Marzin a été nommé Directeur de l'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes (INSIS) du CNRS.

## CEREMONIE

## Marie-Hélène Aubert,

*Conseillère pour les négociations internationales climat et environnement du Président de la République.*



Marie-Hélène Aubert est aujourd'hui Conseillère auprès du Président de la République pour les négociations internationales Climat et Environnement, au sein de la cellule diplomatique. Ecologiste, membre du parti Les Verts de 1990 à 2008, elle a été successivement Conseillère régionale en région Centre (1992-1998), Députée de la 4<sup>e</sup> circonscription d'Eure et Loir (1997-2002), vice-présidente de l'Assemblée nationale (2001-2002), membre de la commission des Affaires étrangères et de la Délégation à l'Union européenne, puis Députée européenne (2004-2009) de l'Ouest, membre au Parlement européen des commissions Agriculture et développement rural, Pêche, et Développement. Professeur de lettres à l'origine, titulaire d'un Master Développement agricole et politiques économiques dans les PED (Paris I Sorbonne-IEDES, 2009), elle a été en 2011 directrice adjointe du bureau d'études Futur Facteur 4, spécialisé sur les questions d'énergie et de développement durable.

**Bruno Lechevin,**  
*Président de l'ADEME*



Bruno Lechevin est diplômé de l'Institut d'études politiques de Paris et de l'Institut des hautes études de défense nationale. Président national d'un mouvement d'éducation populaire et de jeunesse (JOC) à 24 ans, il a intégré en 1979 EDF-GDF Services et a exercé différents mandats syndicaux au sein des industries électriques et gazières. Secrétaire fédéral de la fédération Gaz-Electricité CFDT de 1983 à 1988, il est devenu ensuite secrétaire général et membre du bureau national de la confédération CFDT (1988-1997), avant d'être secrétaire fédéral de la fédération Chimie-Energie (1997-1999). Parallèlement, il était membre du Haut Conseil du Secteur public (1992-1999). Nommé en 2000, pour deux ans, commissaire de la Commission de régulation de l'énergie (CRE) chargée de veiller au bon fonctionnement des marchés de l'électricité et du gaz naturel dans l'intérêt du consommateur final, il a vu son mandat renouvelé pour six ans. En avril 2008, il fut désigné délégué général du médiateur national et, en parallèle, conseiller spécial auprès du Président de la CRE. Bruno Lechevin est Chevalier de la Légion d'honneur et Chevalier de l'Ordre national du mérite. Il est par ailleurs Vice-président, membre fondateur d'Electriciens sans frontières, ONG qui intervient dans le domaine de l'accès à l'énergie et à l'eau dans les pays en développement. Nommé administrateur par décret du 1er février 2013, Bruno Lechevin est Président du Conseil d'administration de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) depuis le 13 mars 2013.

**Kandeh K. Yumkella,**  
*Représentant spécial du Secrétaire général des Nations Unies et chef exécutif de l'initiative Énergie durable pour tous*



Crédit photo: ADEME

Le 24 septembre 2012, le Secrétaire Général a annoncé la nomination du Dr Kandeh Yumkella au poste de Représentant spécial du Secrétaire général des Nations Unies et chef exécutif de l'initiative Énergie durable pour tous. Dr Kandeh Yumkella est ainsi responsable de la planification et de la mise en œuvre de cette initiative. Depuis juillet 2013, Dr Yumkella dirige la coordination globale de l'initiative et supervise les travaux de l'équipe de facilitation mondiale (Global Facilitation Team), ainsi que les opérations des pôles thématiques et régionaux. Avant sa nomination, Kandeh Yumkella a exercé deux mandats de Directeur général de l'Organisation des Nations Unies pour le Développement Industriel (ONUDI), d'abord en décembre 2005, puis il a été réélu en 2009. Avant d'accéder à ce titre, il a occupé plusieurs postes de haut niveau à l'ONUDI. Il a ainsi été Conseiller spécial auprès des deux Directeurs généraux et Directeur du Bureau régional Afrique et pays les moins avancés. Depuis 2008, Kandeh Yumkella préside également l'ONU-Energie, l'organisme qui coordonne les agences des Nations Unies traitant des problématiques énergétiques. Sous son mandat, le groupe a recentré son action sur les problèmes énergétiques mondiaux et a participé à la coordination de la réponse des Nations Unies à ces problèmes. De 2008 à 2010, il a présidé le Groupe consultatif du Secrétaire général sur l'énergie et le changement climatique. Il y a montré à quel point l'absence d'accès à l'énergie entravait les efforts de développement. Le rapport du groupe, publié en avril 2010, a confirmé qu'il était nécessaire d'améliorer l'accès à l'énergie, l'efficacité énergétique et le déploiement d'énergies renouvelables pour faire face au changement climatique et atteindre les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD). Avant de travailler pour l'ONUDI, il a été ministre du commerce, de l'industrie et des entreprises de la République de Sierra Leone de 1994 à 1995. Entre 1987 et 1996, tout en poursuivant ses études, il a occupé divers postes universitaires à l'Université d'État du Michigan et à l'Université de l'Illinois. Il est titulaire d'un doctorat en économie agricole de l'université de l'Illinois, d'un master dans ce même domaine de l'université Cornell et d'une licence en agriculture générale de l'université de Njala en Sierra Leone.

## **Brice Lalonde,**

*Conseiller spécial pour le développement durable du Pacte Mondial des Nations Unies*



Brice Lalonde travaille actuellement en tant que conseiller spécial du Bureau du Pacte mondial des Nations Unies. Il contribue au développement de collaborations avec les gouvernements et autres parties prenantes sur le développement durable et sur le suivi de la Conférence des Nations Unies sur le développement durable. Il a également pour mission d'encourager la durabilité des entreprises et de promouvoir les plateformes sur l'environnement du Pacte mondial, en particulier dans le cadre du programme sur le climat « Caring for Climate » - la plus grande plateforme au monde d'action sur le climat pour les entreprises. Avant d'être successivement Sous-secrétaire général de l'ONU, Coordinateur exécutif de la Conférence des Nations Unies sur le développement durable, en 2011 et 2012, Brice Lalonde fut ambassadeur français chargé des négociations sur le changement climatique, Secrétaire d'Etat puis

ministre français de l'Environnement (de 1988 à 1992), président de la table-ronde pour le développement durable à l'OCDE, et conseiller sur l'Environnement du gouvernement français. Brice Lalonde a également occupé le poste de directeur du bureau de Paris de l'Institut pour une politique européenne de l'environnement. Précurseur de l'écologie politique en France, Brice Lalonde a notamment présidé l'association Les Amis de la Terre dans les années 70, il été le directeur de campagne de René Dumont à la présidentielle de 1974, il s'est présenté lui-même aux élections présidentielles de 1981 comme candidat des écologistes, et a fondé en 1990 « Génération écologie ».

## L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie et du ministère de l'Education nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

En partenariat avec :



ADEME  
20, avenue du Grésillé  
BP 90406 | 49004 Angers cedex 01

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

